

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Electricidad

“Justificación y diseño de falsa protección diferencial de barras para S.E Cerro de la Plata”

AUTOR: JAVIER FERNANDO FELIZ JUÁREZ.

TUTOR: IVÁN LOZANO ÁLVAREZ.

Septiembre 2009

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1 PRINCIPIOS DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	4
2.2 PRINCIPIOS DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS.	9
2.3 TECNOLOGÍAS DE LOS RELÉS DE PROTECCIÓN.....	19
2.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE BARRAS.	33
2.5 PROTECCIONES DE DISTANCIA.....	42
3. CONSECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN. FASES DE ESTUDIO Y DISEÑO	51
3.1 PRIMERA FASE. ALCANCE DEL PROYECTO.....	51
3.2 SEGUNDA FASE. ESTUDIO DE LA TOPOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DE LA SUBESTACIÓN.....	52
3.3 TERCERA FASE. ESTUDIO DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN EXISTENTES.....	57
3.4 CUARTA FASE. 1 ^{ER} DISEÑO DE PROTECCIÓN (DESESTIMADO).....	59
3.5 QUINTA FASE. 2 ^º DISEÑO DE PROTECCIÓN (DESESTIMADO).....	66
3.6 SEXTA FASE. 3 ^{ER} DISEÑO DE PROTECCIÓN (APROBADO). SOLUCIÓN ADOPTADA.....	75
4. COMPARATIVA ECONÓMICA	88
4.1 SOLUCIÓN TRADICIONAL (RELÉ DIFERENCIAL DE BARRAS 87B).....	88
4.2 SOLUCIÓN ADOPTADA.....	89
5. CONCLUSIONES	90
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
7. ANEXO	92
7.1 ESQUEMAS ELÉCTRICOS DESARROLLADOS.....	92
7.2 DOCUMENTACIÓN TÉCNICA.....	93

1. INTRODUCCIÓN.

¿Qué buscamos?

La finalidad de nuestro proyecto es el diseño y justificación de un sistema de protección de barras de alimentación de 45 kV para la subestación eléctrica blindada de “Cerro de la Plata” (Madrid), propiedad de la compañía eléctrica Unión Fenosa Distribución. La particularidad de este diseño radica en la consecución de un sistema de protección de barras de subestación que cumpla las exigencias básicas de los sistemas de protección, sin la utilización de un relé de protección dedicado para esta posición, de ahí la denominación de “falsa” protección diferencial de barras.

¿Por qué?

El motivo de buscar un diseño de una protección de barras “sin relé” es fundamentalmente de tipo económico. El coste de una protección de barras tradicional completa es muy elevado para el nivel de tensión de trabajo (45 kV), lo que hace inviable económicamente este tipo de sistema en estos niveles de tensión. Esta justificación quedará reflejada de forma detallada más adelante en la comparativa económica de ambas soluciones, apartado cuarto del presente proyecto.

¿Cómo?

La esencia de la solución adoptada ha sido crear un automatismo eléctrico por medio de lógica cableada, capaz de detectar la existencia de un defecto (falta) en las barras de alimentación de 45 kV, ejecutar la maniobra de despeje de dicha falta, y señalizar la actuación del sistema de protección, teniendo en cuenta la topología de explotación existente en ese momento y con el fin de evitar en la medida de lo posible daños en los equipos que conforman la subestación, siendo posible reponer el suministro eléctrico afectado de la forma más rápida y segura posible. La maniobra de despeje de la falta consiste en la ejecución de una serie de órdenes de disparo (apertura) a los interruptores de las posiciones de línea, transformador y acoplamiento conectados a la barra en falta.

El automatismo por lógica cableada se ha realizado básicamente utilizando dos tipos de señales lógicas:

- Señales de detección de falta de relés de protección de distancia de líneas, transformadores y acoplamiento.
- Señales de estado de seccionadores e interruptores de estas mismas posiciones.

Los actuadores encargados de ejecutar este sistema han sido relés auxiliares monoestables y biestables de Arteche, dispositivos comúnmente utilizados en esquemas lógicos con este tipo de tecnología, que serán detallados más detenidamente en el apartado teórico del presente proyecto.

La solución adoptada ha sido concebida a lo largo de una serie de fases de estudio y diseño, no siendo esta solución la primera que se tuvo en cuenta, sino siendo la única estudiada que cumplía con los requerimientos buscados.

Antes de entrar en detalle con los aspectos técnicos del presente proyecto, vamos a dar unas breves pinceladas teóricas sobre los principios de los sistemas eléctricos de potencia y los sistemas de protección.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1 PRINCIPIOS DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

Un sistema es, según el diccionario de la Real Academia de la Lengua, " el conjunto de cosas que ordenadamente relacionadas entre si contribuyen a determinado objeto", por lo que podemos nosotros asumir que un sistema eléctrico de potencia es el conjunto de elementos con capacidad de generar, transportar y distribuir la energía eléctrica con el fin de poder dar a los usuarios finales la energía que necesitan para cumplir con sus necesidades.

Desde que en el primer cuarto del siglo diecinueve empiezan a formularse las leyes de la electricidad, y en el siguiente cuarto de siglo, comienzan a construirse equipos y elementos de acuerdo con estas leyes teóricas, el avance que se ha producido en la humanidad, gracias al desarrollo de esta industria, han conducido a una forma de vida que supone el mayor salto cualitativo en el desarrollo social que no se había conocido en la historia, desde el punto de vista tecnológico y de bienestar.

Es, posiblemente, este desarrollo y acceso a los beneficios de la industria eléctrica el hecho mas importante que se ha producido a lo largo del siglo veinte, siendo la base del actual nivel de vida de los países desarrollados, abriendo la posibilidad de acceso de una energía barata y de fácil uso, a todos los países e individuos, por medio del desarrollo de los equipos y elementos a partir de las leyes y principio físicos que soportan la teoría de la electricidad. El que la electricidad tenga una base científico-matemática tan grande, es uno de los pocos desarrollos tecnológicos donde la formulación física y matemática ha ido por delante de los desarrollos productivos, tiene el inconveniente de que estos desarrollos solo han podido producirse por mejora de los materiales y técnicas de construcción, pues los elementos pioneros de la industria eléctrica, dinamos, motores, alternadores, transformadores, etc., no han variado conceptual ni constructivamente desde su origen hasta nuestros días. Así la industria eléctrica ha construido, desde su origen, máquinas con rendimientos superiores al 99 %, lo que ha "impedido", de alguna forma, el desarrollo de elementos de producción y uso de la electricidad diferentes a los actuales, al no existir la necesidad de mejorar unos equipos que de por si dan una calidad y unos rendimientos difícilmente igualables, a unos precios moderados.

Los sistemas eléctricos de potencia modernos, están sometidos a unas exigencias de funcionamiento muy severas, sobre todo en lo referente a calidad y continuidad de suministro. La energía eléctrica es uno de los recursos energéticos principales de la sociedad industrial actual, y por lo tanto, los sistemas eléctricos de potencia deben ser

capaces de disponerla a los usuarios de forma adecuada, cumpliendo unos requisitos de potencia, tensión y frecuencia correctos. Para cumplir con estos requisitos, es necesaria una planificación minuciosa y un diseño esmerado de las instalaciones que componen la infraestructura de los sistemas eléctricos. Hoy en día se imponen también criterios ambientales muy exigentes para conseguir que la explotación de estas instalaciones tenga el mínimo impacto posible en el entorno.

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Los grupos de generación de energía eléctrica se encuentran, por razones técnicas y económicas, alejados de los centros de consumo, por lo que es necesario unir a los productores y los consumidores en forma de escalones de tensión por medio de redes que transportan la energía. La unión y modificación de los niveles de tensión entre las líneas que conforman los diferentes tipos de redes, se realiza en unas instalaciones llamadas subestaciones. Las subestaciones están equipadas con los elementos de corte, medida, control, regulación y mando necesarios para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico de potencia.

Las funciones principales de las subestaciones eléctricas son:

- **Distribución de energía**
 - Trasvasan la energía entre los diferentes tipos de redes.
- **Acondicionamiento de la energía**
 - Transformación de los niveles de tensión.
 - Empleo de elementos de compensación.
- **Interconexión**
 - Definen la topológica de explotación de los sistemas eléctricos.
 - Dotan al sistema eléctrico de flexibilidad.
- **Contribución a la seguridad del sistema**
 - Centralizan los equipos de medida, protección y control de la red.
 - Disponen los equipos y aparataje de corte.

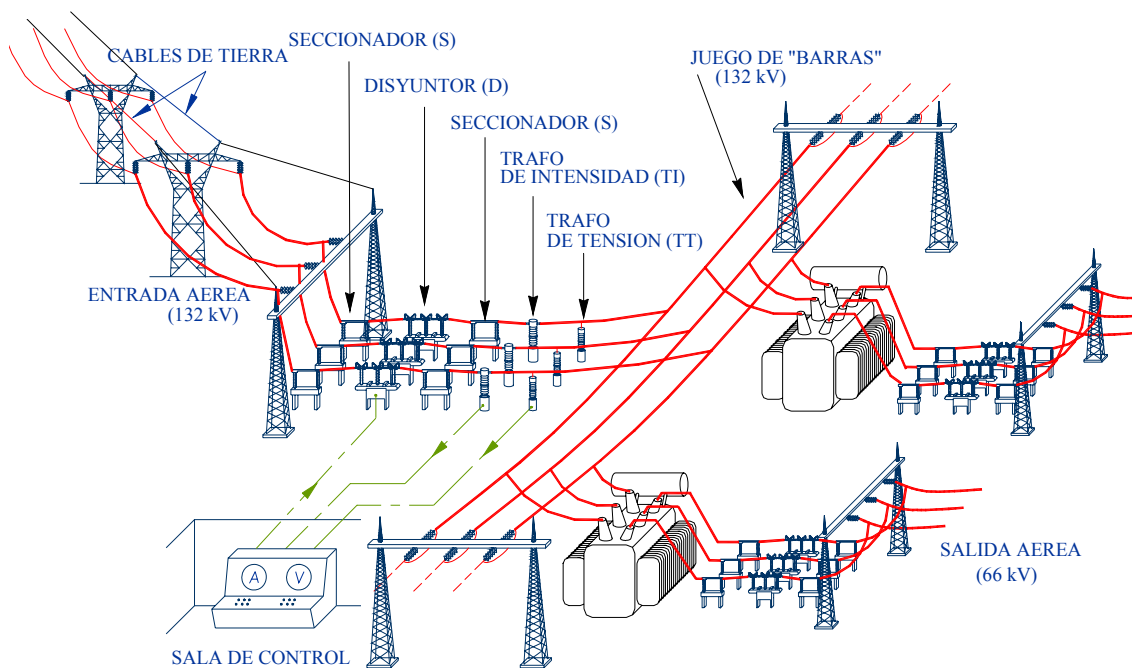


Figura 1. Esquema topológico de subestación intemperie.

ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Atendiendo a su estructura, podemos dividir los sistemas eléctricos de potencia en cinco grandes bloques:

- **Generación**
- **Transporte/ Interconexión**
- **Reparto**
- **Distribución**
- **Consumo**

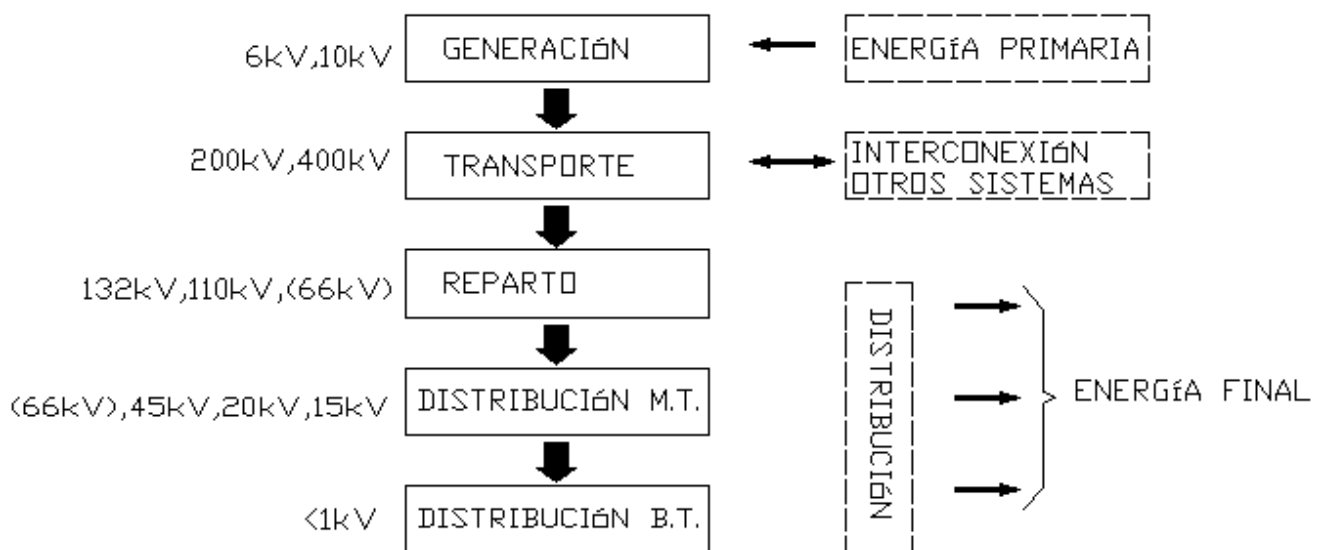


Figura 2. Estructura de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

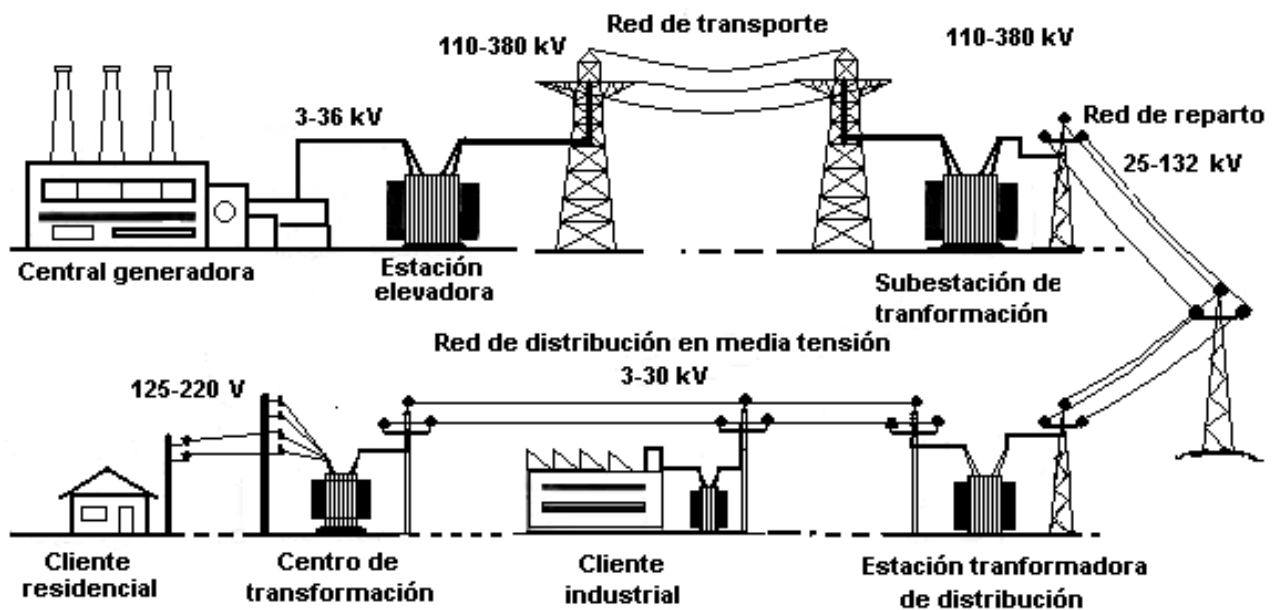


Figura 3. Esquema topológico de un Sistema Eléctrico de Potencia..

Generación

En este bloque podemos encontrar las centrales de generación eléctrica y las subestaciones de generación o elevadoras. La función principal de las centrales eléctricas consiste en convertir una fuente de energía primaria (solar, eólica, hidráulica, biomasa, combustibles fósiles, nuclear etc.) en energía eléctrica generalmente a través de una turbina acoplada a un generador eléctrico (síncrono o asíncrono). La potencia generada en la central se vierte sobre la red de transporte a través de las subestaciones de generación o elevadoras, que transforman la tensión de generación en Media Tensión (6 a 15 kV) a los niveles de tensión de transporte en Alta Tensión (220 kV , 400 kV). El motivo por el cuál se incrementa el nivel de tensión es porque de esta manera se reducen las pérdidas de potencia en el sistema, y permite una utilización de líneas y redes con sección del conductor mucho menores.

Transporte/ Interconexión

A este apartado pertenecen las redes de transporte y las subestaciones de interconexión. Las redes de transporte como su propio nombre indica, son aquellas líneas y redes encargadas de evacuar y transportar la energía eléctrica desde los centros de generación hacia las zonas de consumo. Se caracterizan por su capacidad para transportar grandes potencias a grandes distancias.

Las subestaciones de interconexión están concebidas para unir redes de transporte de gran dimensión y proporcionar vías alternativas de transporte con el fin de

dar una mayor estabilidad al sistema, permitir un intercambio de energía entre sistemas, y disminuir los costes de producción. Las subestaciones de interconexión, suelen ser instalaciones de gran tamaño y potencia, generalmente de tipo intemperie,.

Reparto

En este bloque nos encontramos en primer lugar las subestaciones de transformación, encargadas de reducir los niveles de tensión de transporte (220 kV, 400 kV) a niveles de reparto (132 kV, 66 kV, 45 kV). Las redes de reparto, suministran la potencia a las redes de distribución, pero están limitadas a unas longitudes relativamente cortas. Salvo condiciones muy especiales, estas redes no alimentan nunca directamente a un usuario. Al ser capaces de transportar decenas de MW se necesita que la tensión esté establecida entre 45 kV y 132 kV. En algunos casos nos encontramos estas tensiones a la salida de grupos de generación o uniendo subestaciones, lo que las convierte en redes de transporte.

Distribución

A este bloque pertenecen las subestaciones de distribución, encargadas de transformar los niveles tensión de reparto hasta el nivel de tensión de la red de Media Tensión (66 kV, 20kV, 45 kV). Las redes distribución se encargan de suministrar la energía a los centros de transformación y redes de utilización para su consumo final. Sin embargo, ya podemos encontrar en estas redes de distribución conexiones con clientes cualificados y suministros de potencia a plantas industriales, Las redes de distribución constan normalmente de más de un escalón de tensión, podemos encontrar tensiones próximas a 35 kV e incluso a 66 kV. La concentración de la potencia en una zona puede obligar a un nivel de tensión alto y a una transformación posterior a una red de más baja tensión. Por todo lo comentado anteriormente, es difícil establecer la diferencia entre red de distribución y de utilización, pudiéndose considerar en muchos casos que son la misma red.

ASPECTOS ECONÓMICOS DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Desde el punto de vista de la economía, la importancia de esta energía es tal que si analizamos por encima la producción de energía eléctrica en países como Estados Unidos o España desde los años 1950 a nuestros días comprobamos que la capacidad de generación de energía eléctrica se ha multiplicado por seis, y que el consumo se ha multiplicado por cifras muy superiores, habiendo crecido entre treinta y cuarenta veces el consumo de energía eléctrica en estos años.

Este crecimiento ha provocado una fuerte inversión en investigación y sobre todo ha desarrollado, a partir de los años sesenta del siglo veinte, unas técnicas de gestión de los recursos que han permitido mejorar la explotación de los sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica, lo que normalmente denominados sistemas eléctricos de potencia.

El consumo de energía eléctrica en los países desarrollados supone un mínimo del 25% de la energía consumida en estos países. Prácticamente todas las ramas de la economía dependen de una forma u otra de la energía eléctrica, lo que pone en evidencia la correlación tan estrecha que existe entre la actividad económica de las naciones y la producción y consumo de electricidad. En muchos casos se puede deducir la existencia de problemas económicos por las modificaciones de los consumos de energía eléctrica.

Por otra parte las fuertes inversiones que se necesitan para la producción y distribución de la energía eléctrica nos pueden dar una idea de la importancia económica de la misma. Las inversiones anuales representan alrededor del 50% de los valores añadidos para el conjunto de la producción y distribución, lo que hace que el valor añadido por trabajador sea el triple del que existe para el conjunto de la producción industrial.

Sobre el total de la inversión que se realiza cada año, aproximadamente un 5% se aplica al conjunto producción, transporte y distribución de la energía eléctrica. Si nos ponemos como punto de referencia los países eléctricamente más desarrollados, vemos que el total de la inversión en energía eléctrica supone un 10% de las inversiones realizadas en el campo energético. La búsqueda del rendimiento máximo en las inversiones que debemos realizar en producción y distribución, aparece como un imperativo más que como una necesidad. Esto conduce a la investigación y puesta a punto de las instalaciones nuevas y existentes, con aplicación de técnicas más avanzadas, y a la mejora de la gestión de la explotación de las instalaciones de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica.

2.2 PRINCIPIOS DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS.

Los sistemas de protecciones eléctricas son un conjunto de elementos y dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos encargados de realizar las operaciones de protección de una instalación. En líneas generales, su misión es vigilar y mantener de una forma eficiente y segura, una zona determinada de una instalación eléctrica, como puede ser una subestación, una central, o una línea eléctrica, en la que se incluye el equipo asociado y acoplado a dicha zona de la instalación, como puede ser maquinaria eléctrica (transformadores, motores, generadores), y todo tipo de cargas.,. El sistema de protección debe operar ante toda clase de perturbación que tenga lugar en un instante determinado y que ocasione un comportamiento *anormal* de la instalación. Esta situación no deseada, produce el deterioro o incluso la destrucción de los equipos y de la propia infraestructura de la instalación eléctrica.

Existen perturbaciones de muchos tipos:

- Cortocircuitos (faltas).
- Sobretensiones o subtensiones.
- Desequilibrios en corrientes o tensiones.
- Aumento peligroso de temperatura en máquinas y equipos.
- Variación de la frecuencia del sistema.

- Armónicos de corriente o tensión.

La naturaleza de estas perturbaciones pueden ser:

- Fenómenos atmosféricos (Rayos, tormentas, vendavales etc.).
- Maniobras de acoplamiento de interruptores, seccionadores, contactores etc.
- Fallos de aislamiento por desgaste y envejecimiento de los equipos.
- Inyección de armónicos por convertidores electrónicos.
- Cambios repentinos de la generación o de la demanda de potencia eléctrica.

Algunos daños que pueden ocasionar las perturbaciones son:

- Incendios.
- Explosiones.
- Electrocutaciones.
- Deformaciones en conductores y máquinas eléctricas.
- Destrucción de equipos eléctricos y electrónicos.
- Cortes prolongados de suministro eléctrico.
- Inestabilidad del sistema eléctrico.

Consecuentemente, podemos apreciar la enorme importancia de los sistemas de protección dentro de las instalaciones eléctricas, en cuanto a la seguridad de las personas y equipos, e incluso a factores económicos.

El elemento principal del sistema de protección es el relé de protección, consiste en un dispositivo electromecánico o electrónico cuyo cometido es evaluar una serie de variables y parámetros eléctricos que determinen una condición anormal de funcionamiento en la instalación o equipos y tomar las medidas correctoras oportunas, que generalmente se traducen en aislar la perturbación del sistema dando órdenes de apertura(disparo) a aquellos dispositivos de conexión (interruptores) que alimentan el defecto.

El esquema general de un sistema de protección es el siguiente:

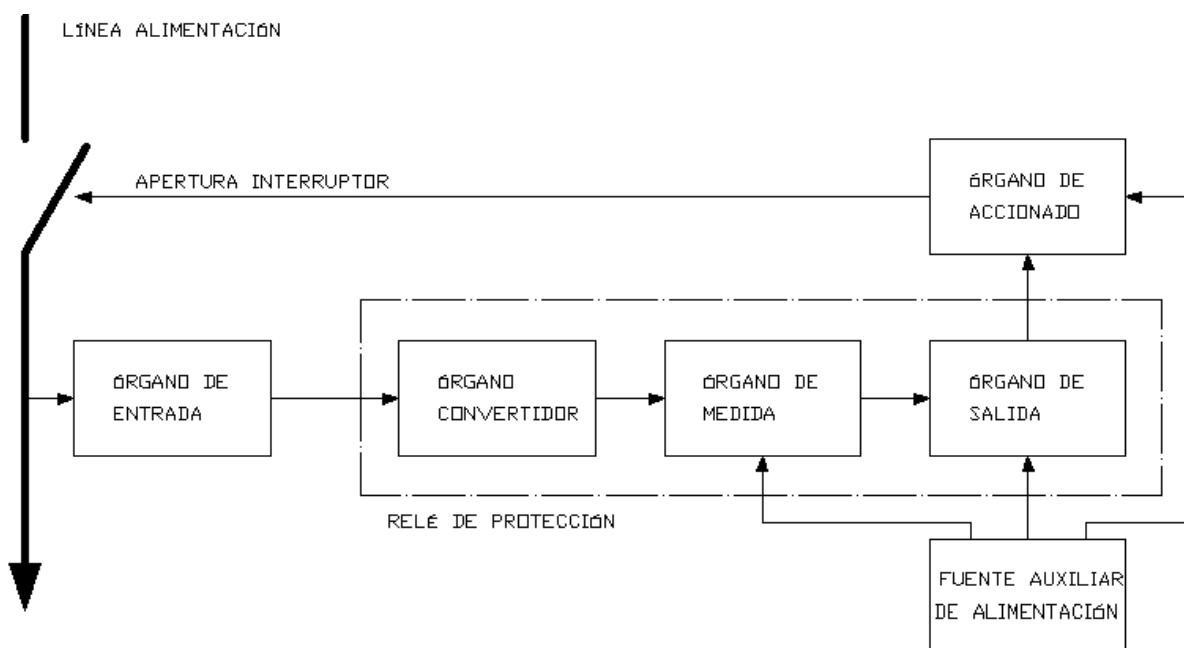


Figura 4. Esquema general de un sistema de protección.

Órgano de Entrada

Detecta las señales eléctricas procedentes de una perturbación (corrientes, tensiones) y las transforma en valores adecuados para ser recogidos por el relé de protección. Por lo general, estos dispositivos son transformadores de corriente y tensión, los cuales, además de realizar las funciones descritas, sirven de aislamiento eléctrico entre las partes de alta y baja tensión de la instalación.

Órgano Convertidor

Se encarga de acondicionar las señales previamente transformadas por el Órgano de Entrada para su tratamiento posterior. En ocasiones este elemento no existe.

Órgano de Medida

Es la parte más importante del dispositivo de protección, este elemento se encarga de decidir si las señales entrantes son señales procedentes de una situación anormal de funcionamiento (perturbación) y tomar la decisión de operación del sistema de protección. Esta decisión se realiza a través de algoritmos de cálculo por medio de elementos electromecánicos (relés electromecánicos), dispositivos electrónicos estáticos (relés electrónicos convencionales) o microprocesadores (relés electrónicos digitales).

Órgano de Salida

En este bloque se realiza la amplificación de la señal de operación de la protección procedente del Órgano de Medida y en su caso, engloba los elementos necesarios para aumentar el número de señales de salida. Los Órganos de Salida clásicos son los contactores de mando y modernamente los elementos lógicos con sus correspondientes dispositivos de amplificación.

Órgano Accionado

Generalmente este órgano se trata de la bobina de disparo de interruptores y disyuntores, que a través de un pequeño campo magnético consiguen liberar los muelles encargados de realizar la apertura física del interruptor.

Fuente Auxiliar de Alimentación

Este dispositivo se encarga de proporcionar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema de protección. Esta tensión auxiliar puede ser una batería de acumuladores de Baja Tensión o bien la propia red a través de transformadores.

EXIGENCIAS BÁSICAS DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

El campo de las protecciones tiene una antigüedad del orden de unos 80 años, y a lo largo de este periodo se ha producido una gran evolución a través de las modernas tecnologías para adaptarse a las nuevas topologías y diseños de los sistemas. Por lo tanto, cada vez los requerimientos y especificaciones de los sistemas de protecciones son más exigentes, ajustándose su diseño a factores de seguridad, calidad de servicio y económicos.

A todo sistema de protección se le exige cuatro requisitos fundamentales:

- ***Sensibilidad.***
- ***Selectividad.***
- ***Rapidez***
- ***Fiabilidad***

Sensibilidad

El relé debe detectar una perturbación o defecto en todo momento, y bajo todo tipo de condiciones, incluso en condiciones de defecto mínimo que pueda existir. La selectividad de las protecciones tiene dos naturalezas, una intrínseca dada por sensibilidad de los transformadores de protección auxiliares, los transductores y componentes internos del propio relé y circuitos asociados, y otra extrínseca, que se puede modificar, y es configurable en función de los parámetros de la instalación adaptándose a las especificaciones dadas.

Selectividad

La selectividad de un relé es la capacidad que tiene para reconocer que cuando se produce un defecto en el sistema, éste tiene lugar en su zona de actuación y debe despejarlo. El relé debe distinguir aquellas perturbaciones o defectos para los que debe operar de aquéllas que deben ser despejadas por otros, ya que están fuera de su zona. Algunas protecciones son inherentemente selectivas, por ejemplo la protección diferencial (87), lo que implica que no se ven afectadas por ninguna falta que se produzca fuera de sus radios de acción. Otras protecciones son *relativamente* selectivas, con actuación diferida, por ejemplo la protección de sobreintensidad de tiempo diferido (51), en este tipo de protección, la selectividad se consigue a través de los ajustes de los niveles de respuesta y de los tiempos de operación (curvas inversa, muy inversa,

extremadamente inversa), en coordinación con los que se pretenden sean selectivos. Esto último viene a decir que este tipo de protección relativamente selectiva forma parte de una protección de apoyo, de la que hablaremos más adelante. Lo que se pretende es que la falta sea despejada por el relé que la tenga en su zona, y si pasado un tiempo (actuación diferida) no ha sido eliminada, operará para aislarla del sistema. Esta característica es el parámetro fundamental a tener en cuenta para realizar la *Coordinación de Protecciones* de la instalación.

Rapidez

La rapidez define el tiempo de respuesta del relé desde que ocurre el defecto hasta que opera. Este factor es esencial para conseguir disminuir los daños ocasionados en los equipos por el defecto. Una mayor rapidez repercute en una disminución del coste de reparación e indisponibilidad del equipo dañado, así como mejora la estabilidad general del sistema; durante una falta por cortocircuito, existen zonas donde se pierde la transmisión de energía, pudiendo sacar de sincronismo a generadores que puedan estar acoplados, afectando a la estabilidad del sistema.

Fiabilidad

La fiabilidad define la probabilidad de que el sistema de protección va actuar correctamente, por decirlo de alguna manera, mide el grado de confianza del sistema de protección.

El término fiabilidad engloba dentro de sí dos conceptos. Por un lado la *obediencia*, que es la cualidad de que una protección opere cuando le sea requerido, y por otro lado la *seguridad*, que es la cualidad de no operar ante causas extrañas, evitando actuaciones incorrectas y disparos intempestivos.

La fiabilidad de un sistema de protecciones depende, en primer lugar, de la fiabilidad de los propios relés, y en segundo lugar, de su forma de aplicación (disparo en serie o paralelo), de su correcta instalación y de su mantenimiento preventivo.

Existen muchas otras exigencias en un segundo plano que pueden cumplir las protecciones, algunas de ellas son:

Flexibilidad

Facilidad para adaptarse a modificaciones o ampliaciones futuras de la instalación.

Simplicidad

Diseño sencillo de las protecciones, reducir el número de funciones e interacciones entre dispositivos para evitar órdenes ambiguas que produzcan problemas de actuación, esto es, un aumento de la fiabilidad, además de unos costes de inversión y mantenimiento menores.

Autodiagnóstico

La incorporación de mecanismos de verificación del estado correcto del sistema de protecciones conlleva enormemente a aumentar la fiabilidad del sistema y la reducción de mantenimiento.

Modularidad

La fabricación de los elementos de forma modular facilita en gran manera las labores de montaje, cableado y prueba de los equipos.

Precio

Factor fundamental para la viabilidad de los sistemas de protecciones, hoy en día es el primer factor a tener en cuenta para llevar a cabo un sistema de protecciones.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

La filosofía general de aplicación de los relés y equipos de protección es dividir el sistema eléctrico de potencia en zonas que puedan ser protegidas adecuadamente por equipos específicos. Las zonas afectadas en caso de falta deberán ser desconectadas de la red en un tiempo muy corto, causando el mínimo impacto en el resto del sistema que permanezca en servicio. Los equipos de protección que comprenden cada zona podemos dividirlos en dos tipos:

- ***Protecciones primarias***
- ***Protecciones de apoyo***
 - *Remoto*
 - *Local*

Hablando en términos estratégicos, las protecciones primarias las podríamos denominar como las de “primera línea de defensa “ y están diseñadas para actuar en primer lugar y aislar exclusivamente el elemento o la zona en falta de la red cuando ocurra el defecto. Sin embargo, si la falta no ha podido ser despejada por la protección primaria, deberá actuar en la protección de apoyo, que en algunos casos conlleva la realización de una serie de maniobras con los elementos de desconexión (interruptores) adyacentes a la posición en falta (apoyo local) o incluso con subestaciones cercanas (apoyo remoto), desconectando una mayor parte del sistema eléctrico.

Protecciones primarias.

En los grandes sistemas de generación y transporte de energía, donde la manipulación de ésta es masiva, las protecciones primarias se diseñan para que operen con gran rapidez en cualquier tipo de falta que se produzca. Se podrán utilizar protecciones primarias más lentas en sistema de menor importancia, pero en general, en cualquier sistema, las protecciones primarias deberán ser aquellas que den la repuesta más rápida posible compatible y coordinada con las características del sistema.

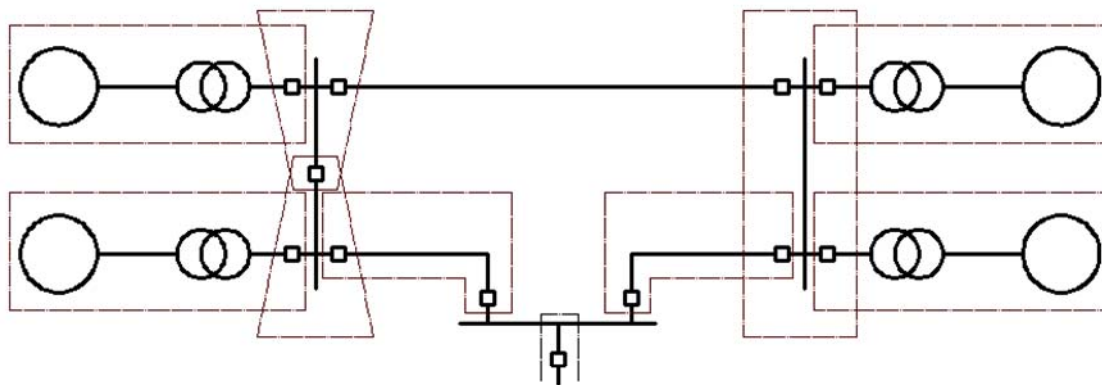


Figura 5. Zonas de protección primarias.

En la figura 5 se muestran las zonas de acción de las protecciones primarias en un sistema eléctrico. Se puede ver como estas zonas de protección están dispuestas de forma que haya un solape alrededor de los interruptores. Este solape se hace con el propósito de eliminar la posibilidad de que haya espacios ciegos o áreas no protegidas. Una falta dentro de un área solapada, provocará el disparo de todos los interruptores de dos zonas primarias. Este disparo extensivo a dos áreas es necesario porque una falta dentro de una zona solapada es, en efecto, una falta en el interruptor y no existe garantía de que el interruptor involucrado en la falta opere correctamente.

Protecciones de apoyo

Las protecciones de apoyo se instalan para cubrir los posibles fallos en los equipos de las protecciones primarias y también, de los posibles fallos del interruptor. Las causas que pueden producir los fallos en los relés son:

- Fallo en los circuitos de alimentación de C.A. por defecto en los transformadores de medida o en sus cables de conexión.
- Fallo en la fuente de alimentación de C.C de los circuitos de disparo y control.
- Fallo en los dispositivos auxiliares.
- Fallo en el propio relé.

Las causas que pueden contribuir al fallo de un interruptor son:

- Fallo en el circuito de disparo (alimentación C.C).
- Bobina de disparo en cortocircuito o en circuito abierto.
- Fallo mecánico en el dispositivo de disparo.
- Fallo en los contactos principales del interruptor.

Todo esquema de protección de apoyo debe servir de soporte tanto para el relé como para el interruptor o interruptores que accionan.

La protección de apoyo ideal debe ser instalada de forma que cualquier elemento o dispositivo que produzca en un momento dado un fallo en la protección primaria, no sea motivo también de fallo en la protección de apoyo. Es por lo que en casos muy concretos, se recomienda duplicar los circuitos de disparo y control, incluso en algunos casos, los transformadores de medida.

Una condición básica es que la protección de apoyo no opere hasta que la primaria haya tenido la oportunidad de hacerlo. Por ello, siempre existe una demora asociada a la operación de las protecciones de apoyo. Cuando se produce un cortocircuito arrancan ambas protecciones para operar, pero si la primaria despeja la falta, la de apoyo debe reponerse antes de completar su ciclo de disparo. Si la falta no es despejada por la primaria, al cabo de un cierto tiempo programado actuará la protección de apoyo, disparando los interruptores necesarios para aislar la falta del sistema.

Protecciones de apoyo remoto

En las protecciones de apoyo remoto, las faltas se despejan desde las subestaciones adyacentes a donde se ha producido la falta. Por ejemplo, consideremos el siguiente esquema :

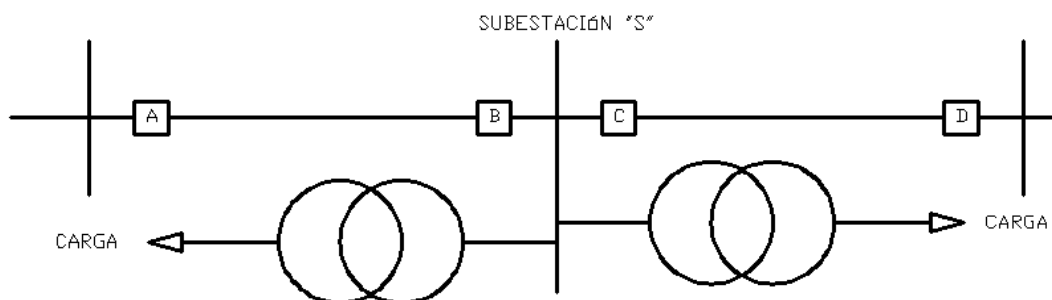


Figura 6. Actuación de protección de apoyo remoto.

En la figura 6, los relés con demora en A hacen la protección de apoyo de la línea CD (por ejemplo, segunda y tercera zona de los relés de distancia en A. Si se produce un fallo en el interruptor C para una falta en la línea CD, los relés en A dispararán los interruptores asociados aislando la falta. Es decir, los relés y el interruptor A darán la protección de apoyo a los relés y al interruptor C. De forma análoga, los relés y el interruptor D darán apoyo a los relés e interruptor B, y por lo tanto, los relés e interruptores en A y D servirán de apoyo a la subestación S. Si en las protecciones de las líneas que se muestran en la figura anterior se utilizan relés de distancia, el tiempo en despejar la falta por la protección de apoyo para una falta próxima al interruptor C, estará comprendido entre 0,25 s y 0,5 s. (segunda zona de los relés en A), mientras que para faltas próximas al interruptor D podría ser hasta de 3 segundos (tercera zona de los relés en A). Estos tiempos serían aún superiores si la protección de apoyo fuese a base de relés de sobreintensidad de tiempo diferido.

En los sistemas actuales, las protecciones de apoyo remoto se utilizan en áreas de no excesiva responsabilidad. Es cierto que por una pequeña cantidad de dinero se pueden añadir a las protecciones primarias las funciones de apoyo remoto y utilizar de esta manera, las protecciones primarias de la línea A-B también como protecciones de apoyo de la línea C-D. Sin embargo, este tipo de protecciones de apoyo remoto tiene dentro de los sistemas actuales muchas limitaciones.

Las protecciones de apoyo remoto son de por sí lentas, y además, cuando operan provocan el disparo de más interruptores que los estrictamente necesarios para despejar la falta, dejando una gran parte del sistema sin suministro eléctrico en detrimento de la calidad de servicio y con el consiguiente perjuicio económico.

Los actuales sistemas eléctricos de potencia van incrementando la complejidad debido al gran número de generadores conectados a la red, a la multiplicidad de

interconexiones que aportan las corrientes a las faltas y también a que cada vez deben atender mayores cargas. Como resultado de esta expansión, se hace hoy en día difícil instalar protecciones de apoyo remoto en subestaciones adyacentes.

Protecciones de apoyo local

Cuando por las limitaciones antes señaladas, las protecciones de apoyo remoto no son aconsejables, se instalan las denominadas de apoyo local. En las protecciones de apoyo local las faltas se despejan a través de los relés ubicados en la misma instalación. Este tipo de protección hace de apoyo del fallo en los relés, y también del fallo en el propio interruptor.

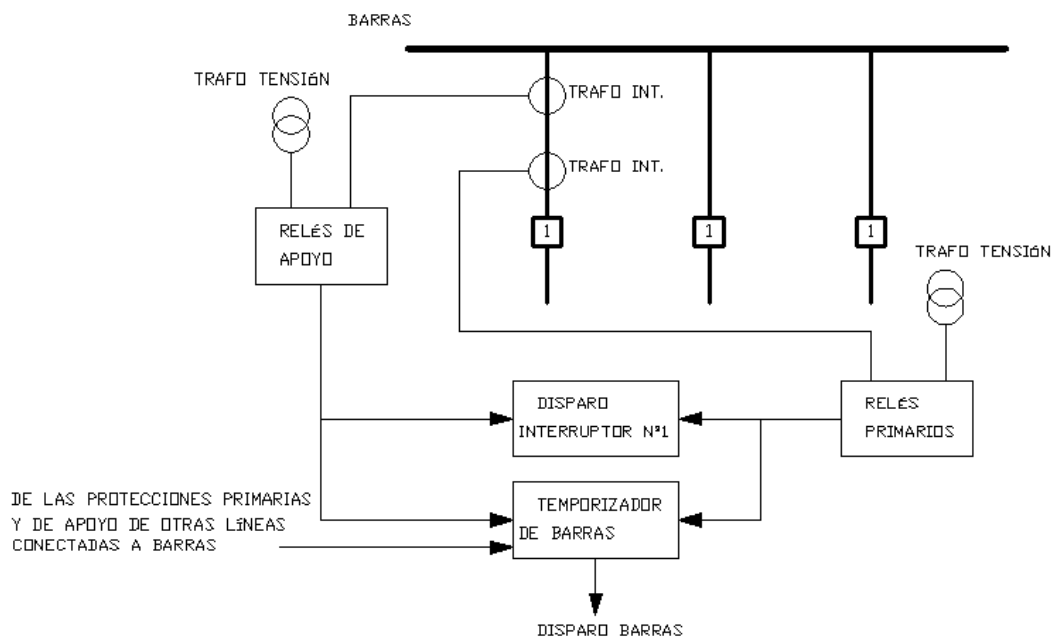


Figura 7. Esquema simplificado de apoyo local.

El esquema que se muestra es para una línea conectada a barras y con la utilización de protecciones redundantes en cada terminal de línea. La protección primaria puede ser, por ejemplo, un relé de distancia. La protección de apoyo puede ser idéntica a la protección primaria, aunque normalmente de distinta tecnología o integrada por equipos con otras funciones. Suelen utilizarse transformadores auxiliares distintos para ambas protecciones.

Si consideramos que se produce una falta en la línea protegida ambas protecciones operarán y darán orden de disparo al interruptor de línea. La protección de apoyo será tan rápida como la primaria. Al actuar cualquiera de los dos conjuntos de protección dando orden de inicio al ciclo de apertura del interruptor, mandarán al mismo tiempo arrancar al temporizador de la función de apoyo de fallo de interruptor. Si este, a pesar de recibir la orden no dispara, el relé de línea permanecerá en su posición de operado, permitiendo al temporizador que alcance el final del tiempo dando este temporizador orden de disparo a los otros interruptores asociados a la barra correspondiente, los necesarios para aislar la falta.

Para evitar que un fallo en la alimentación de C.C. anule las protecciones, es práctica usual duplicar las líneas de alimentación de los circuitos de disparo control, e incluso, en casos de sistemas de gran responsabilidad, grupos distintos de baterías diseñando la circuiterías de disparo y control, de manera que las correspondientes a las protecciones primarias estén aisladas eléctricamente de aquellas de apoyo.

Para ilustrar la aplicación de una protección de apoyo local nos referimos a la siguiente figura:

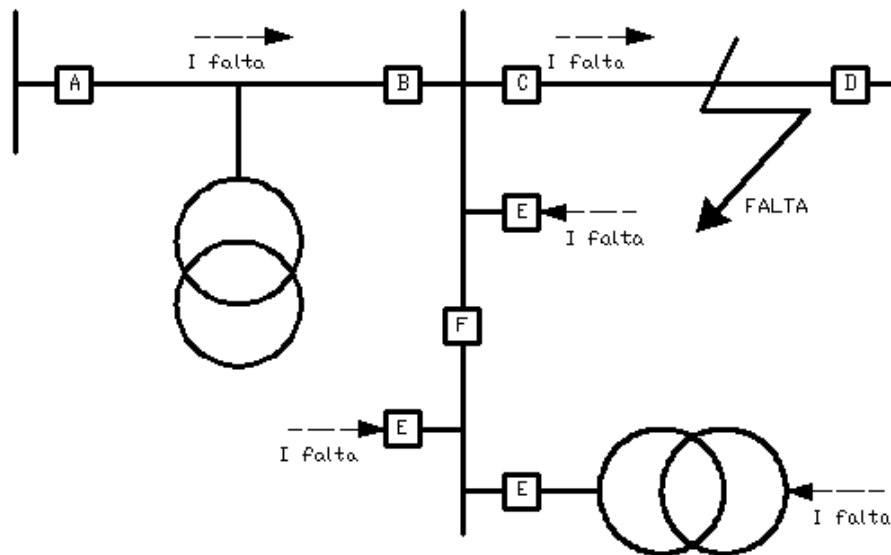


Figura 8. Actuación de protección de apoyo local.

Suponemos que en interruptor C se ha instalado una protección de apoyo local. Si ocurre una falta en la línea C-D próxima al interruptor C, para despejar esta falta la protección funcionará de forma que si las protecciones primarias y de apoyo en C son de distancia, operarán con gran rapidez para despejar la falta. Ahora bien, en el caso de que fallara el interruptor C y no disparará, el temporizador de barras iniciará su ciclo que al cabo de su tiempo de ajuste (entre 0,1 – 0,2 s) provocaría el disparo de los interruptores B, E y F.

Con la protección de apoyo local, la falta será despejada en un tiempo mucho menor que con el apoyo remoto y además, no se desconectarán generadores y cargas del sistema.

FUNCIONALIDAD DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

Las funciones que pueden realizar los sistemas de protección son muy diversas. Como anteriormente se ha señalado, hay que realizar un estudio exhaustivo de la instalación o equipo a proteger para determinar la función o funciones que tiene que realizar nuestro sistema para conseguir una protección eficiente.

Antiguamente había que instalar un relé para cada función de protección que queríamos conseguir. Hoy en día, en las instalaciones eléctricas de potencia como centrales o subestaciones eléctricas, se utilizan modernos relés de protección llamados multifunción, capaces de realizar diferentes funciones en un mismo equipo.

Vamos a enumerar algunas de las principales funciones de protección atendiendo a la clasificación de la Norma *ANSI/IEEE C37.2*.

LISTA DE FUNCIONES DE PROTECCIÓN

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
21	Relé de distancia.
27	Relé de mínima tensión.
32	Relé direccional de potencia.
37	Relé de mínima potencia.
46	Relé de inversión de intensidades de fase.
47	Relé de tensión de secuencia de fases.
49	Relé térmico de máquina.
50	Relé instantáneo de sobreintensidad.
51	Relé de sobreintensidad de tiempo diferido.
55	Relé de factor de potencia.
59	Relé de sobretensión.
60	Relé de equilibrio de tensiones.
61	Relé de equilibrio de intensidades.
64	Relé de faltas a tierra.
67	Relé direccional de sobreintensidad.
81	Relé de frecuencia.
86	Relé de disparo.
87	Relé diferencial.
91	Relé direccional de tensión.
92	Relé direccional de tensión y potencia.

Tabla 1. Funciones de protección.

2.3 TECNOLOGÍAS DE LOS RELÉS DE PROTECCIÓN.

A lo largo de los años, los sistemas de protección han ido evolucionando en gran medida gracias a los avances tecnológicos que la historia nos brindaba. Ésta evolución ha permitido a los sistemas de protección no sólo poder adaptarse a las nuevas y cada vez más densas redes y sistemas eléctricos, sino mejorar y aumentar de forma notable las prestaciones y exigencias de los mismos.

Vamos a realizar un breve repaso de las distintas tecnologías constructivas de los relés de protección que nos permitirá hacernos una pequeña idea de cómo se llevó a cabo la evolución de los sistemas de protección.

RELÉS ELECTRÓMECÁNICOS DE PROTECCIÓN.

Estos tipos de relés fueron los primeros en utilizarse en los sistemas de protecciones, y pueden considerarse como los padres de los relés actuales. Fueron empleados durante muchas décadas, realizando una buena cantidad de funciones de protección con relativamente buen rendimiento. Sin embargo, aunque actualmente su labor como relés de protección esté prácticamente extinta, la utilización de algunos de ellos como el *relé de armadura basculante(monoestable)* o el *relé biestable* para realizar funciones auxiliares tales como señalización, energización de circuitos, o incluso automatizaciones por medio de lógica cableada; como de hecho es el objetivo del proyecto que nos ocupa, es fundamental hoy en día.

Estos tipos de relé han pasado a denominarse *relés auxiliares* y serán el motor principal para obtener la protección de barras de nuestro proyecto.

El funcionamiento básico de los relés electromecánicos consiste en transformar las variables eléctricas medidas de entrada (tensiones, corrientes), en variables mecánicas proporcionales (desplazamientos lineales, rotaciones etc.), por medio de fuerzas y pares que obedecen a las leyes físicas electromagnéticas y mecánicas.

Atendiendo a sus características constructivas, podemos clasificar los relés electromecánicos en los siguientes tipos principalmente:

- ***Armadura basculante.***
 - *Monoestable.*
 - *Biestable.*
- ***Disco de inducción.***
- ***Copa o cilindro de inducción.***
- ***Bobina móvil.***

Armadura basculante

Estos tipos de relés, como se indicó en la introducción de este documento, serán los “*ejecutores*” de nuestra automatización por lógica cableada para conseguir la protección de barras de nuestra subestación.

Existen dos tipos de relés de “*armadura basculante*” atendiendo a su método de reposición:

- *Monoestable.*

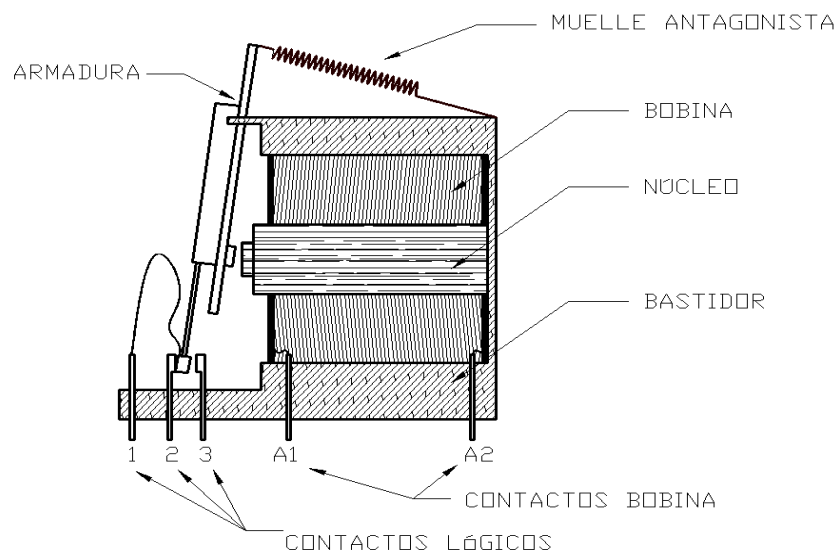


Figura 9.1. Relé auxiliar monoestable.

En la figura 9.1 observamos el esquema constructivo del relé de armadura basculante monestable. Consiste en un bastidor generalmente metálico, como por ejemplo de fleje de acero magnético, aunque también puede ser de plástico, que soporta un núcleo sobre el que se monta una bobina. Sobre el propio bastidor va acoplada una pletina o armadura metálica. Un punto de la armadura está unido rígidamente al bastidor a modo de bisagra, permitiendo el pivotamiento, el extremo de la armadura más cercano al punto de unión está sujeto al bastidor por medio de un resorte que intenta separar el otro extremo libre de la armadura del polo de la bobina y que realiza la función de fuerza antagonista de otra fuerza, la cuál está ejercida por el campo magnético producido por la bobina cuando ésta es energizada, y que intenta atraerla hacia un polo de la bobina. Cuando este extremo de la armadura es atraída hacia la bobina por efecto del campo magnético, cierra o abre en su desplazamiento uno o varios contactos que lleva asociados. Cuando cese el campo magnético, la armadura basculará en sentido contrario volviendo a la posición de reposo.

- *Biestable.*

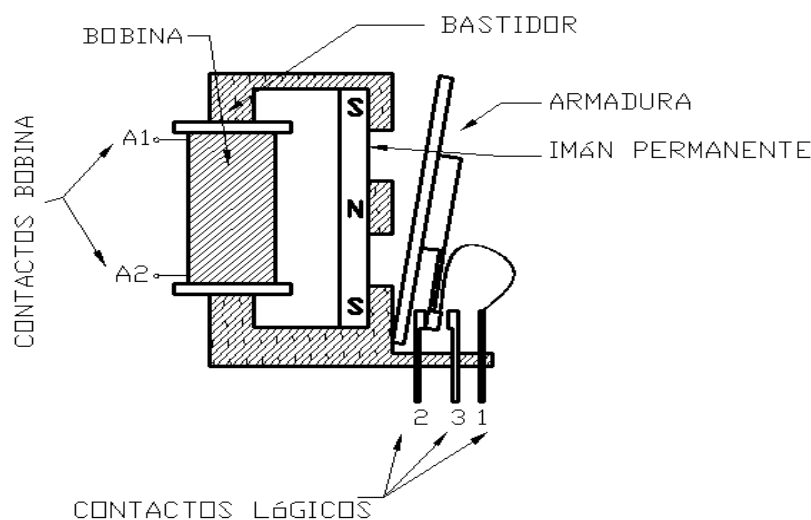


Figura 9.2. Relé auxiliar biestable.

En la figura 9.2 observamos es esquema constructivo del relés de armadura basculante biestable. Al igual que el monoestable, consiste en un bastidor metálico o de plástico sobre el que va montado un núcleo magnético acoplado a una bobina, un imán permanente y una armadura basculante que establece el estado de los contactos lógicos del relé. El funcionamiento es análogo al monoestable, la diferencia radica en que la reposición de los contactos no la realiza un resorte antagonista, sino una fuerza magnética de polarización producida por el imán permanente en el circuito magnético. Al aplicar un pulso de corriente continua de una determinada polaridad en los extremos de una bobina, la armadura móvil basculará hacia el lado correspondiente a la interacción magnética entre bobina e imán (sentido de repulsión) cerrando o abriendo a su vez los contactos lógicos asociados. Al modificar la polaridad del pulso de en la bobina, el campo magnético será contrario al anterior y la armadura basculará hacia el lado opuesto abriendo los contactos que previamente estaban cerrados y viceversa. Una de las aplicaciones más importantes del relé biestable es la señalización del estado de interruptores y seccionadores subestaciones eléctricas, al estar éstos un número muy elevado de horas en la misma posición, su señalización de estado mediante relés biestables es idónea, al operar mediante pulsos de tensión, a diferencia de los monoestables que necesitan una tensión permanente para operar, lo que produciría un temprano deterioro del relé, un aumento de la probabilidad de fallo y de los costes de mantenimiento.

El proceso de abrir o cerrar contactos es el cometido final del relé de armadura basculante, y significará conectar o desconectar un circuito para una aplicación determinada. Los contactos asociados pueden ser de dos tipos:

- *normalmente abiertos (NO)*

Los contactos cierran el circuito al energizar el relé y lo abren en posición de reposo.

- *normalmente cerrados (NC)*

Si por el contrario los contactos abren el circuito al energizar el relé.

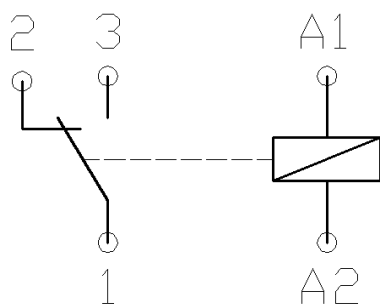


Figura 9.3. Contactos monoestable.

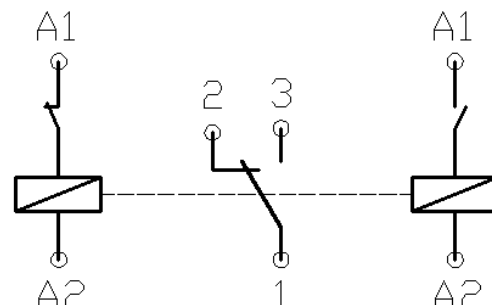


Figura 9.4. Contactos biestable.

Ventajas

- Estructura simple y robusta.
- Velocidades de operación elevadas.
- Coste bajo.

Inconvenientes.

- Bajo poder de reposición.
- Precisión baja en respuesta y caída.
- Sólo responde ante una magnitud (intensidad o tensión).

Aplicaciones más comunes.

- Señalización de estados y eventos (alarmas, actuaciones).
- Multiplicador de contactos.
- Conexión y desconexión remota de circuitos.
- Reposición manual de circuitos.

Disco de inducción

Las unidades de disco de inducción son las más numerosas del parque existente de relés de protecciones fabricados con tecnologías electromecánicas precedentes.

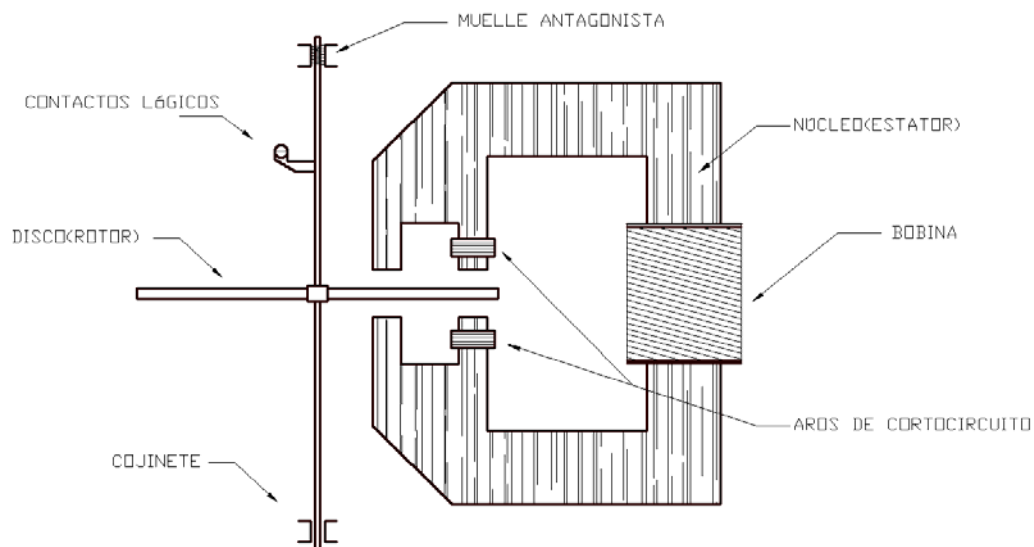


Figura 10. Relé de disco de inducción.

El disco de inducción como podemos observar en la figura, consiste en un disco metálico de cobre o aluminio que puede girar entre los polos de un elemento electromagnético. Estas unidades se basan en el principio de los efectos mutuos entre campos magnéticos y las corrientes eléctricas inducidos por ellos. Cuando dos flujos magnéticos paralelos entre sí inciden perpendicularmente en un disco de metal no

magnético, pero conductor, se desarrolla una fuerza dirigida del flujo adelantado hacia el flujo retrasado generando un par de giro en el disco, proporcional a la tensión o intensidad aplicada, obteniéndose por tanto, un tiempo inversamente proporcional a la magnitud medida. Uno de los flujos es el generado por la magnitud eléctrica que se aplica al elemento electromagnético que forma parte de la unidad, y el otro flujo, es el producido mediante unos aros de cortocircuito (*aros de sombra*) colocados asimétricamente en una parte del núcleo electromagnético, o por unas bobinas en cortocircuito (*bobinas de sombra*) que sustituyen estos aros. Las bobinas de sombra, a través del contacto de un elemento direccional, van a permitir que una unidad de sobreintensidad del tipo de disco de inducción se convierta en una unidad de sobreintensidad direccional.

Ventajas

- Tienen un par suave y sin vibraciones.
- Pueden obtenerse varias curvas características diferentes.
- Pueden operar por la acción de una única magnitud, suma o resta de dos magnitudes y por el seno del ángulo que forman estas dos magnitudes.
- Permiten control direccional.
- Pueden permanecer permanentemente en posición de operado.
- Alto valor de reposición.

Inconvenientes.

- Tiempo elevado de reposición.
- Tendencia al desajuste.
- Mayor mantenimiento.
- No pueden ser utilizados en c.c.
- Valor de operación afectado por la variación de frecuencia.

Copa de inducción

La unidad de copa de inducción se basa en el mismo principio de efectos mutuos de flujos paralelos retrasados uno respecto al otro para conseguir un par de giro proporcional a la magnitud medida. Sin embargo, la diferencia radica en que a disponer el núcleo (estator) de varios polos, permite su utilización en aquellos relés de protección en los que sea necesario comparar más de una magnitud, como por ejemplo relés de distancia.

Su estructura consiste en un cilindro mecánico, generalmente de aluminio, que termina en forma de copa. Esta copa metálica gira en un entrehierro anular que se forma entre el elemento electromagnético situado en la parte exterior de la unidad y un núcleo magnético fijo central. En sus configuraciones más actuales, la copa de inducción está formada por cuatro u ocho polos salientes, distribuidos simétricamente alrededor de la circunferencia externa de la copa.

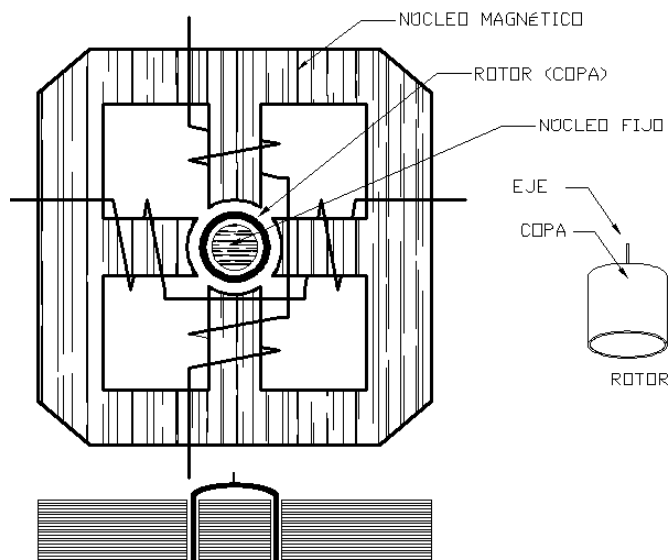


Figura 11. Relé de copa de inducción.

En la figura 11 se muestra esquemáticamente una unidad básica de cuatro polos salientes. Los órganos de giro de esta unidad son de muy pequeña inercia y por lo tanto muy sensibles, precisando muy poca energía eléctrica para su operación, Solidario al eje del rotor va dispuesto un contacto móvil que al realizar el giro, establece contacto con otro fijo.

Estas unidades al igual que las unidades de disco de inducción que hemos comentado anteriormente, han sido utilizadas con gran profusión como unidades direccionales y de distancia, constituyendo características de reactancia, de admitancia (Mho) y de impedancia.

Ventajas

- Par suave y sin vibraciones.
- Gran velocidad de actuación.
- Pueden operar por la acción de una única magnitud, suma o resta de dos magnitudes y por el seno del ángulo que forman estas dos magnitudes.
- Permiten control direccional.
- Pueden permanecer permanentemente en posición de operado.
- Operación independiente de la forma de onda.
- Característica muy estable.
- Tiempo bajo de reposición.
- Constitución muy robusta.

Inconvenientes

- Golpes fuertes de operación pueden producir rebotes en los contactos.
- Tendencia al desajuste.
- Mayor Mantenimiento.
- No pueden ser utilizados en c.c.
- Valor de operación afectado por la variación de frecuencia.

Sistemas de bobina móvil

Los equipos de bobina móvil ocupan una situación intermedia entre los equipos electromagnéticos y los electrónicos. Poseen algunos elementos electrónicos tales como diodos, resistencias y condensadores, pero la medida se efectúa aún electromagnéticamente por medio de un dispositivo de medida polarizado de cuadro móvil. Este sistema mide por integración los valores medios de la magnitud de entrada.

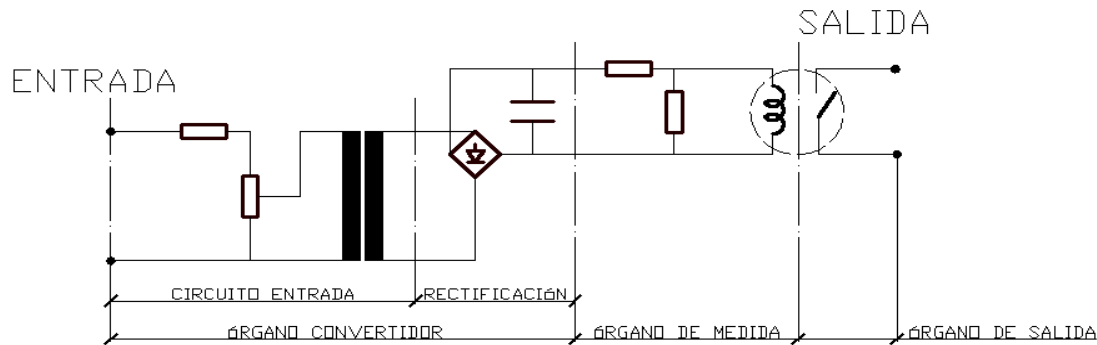


Figura 12. Relé de bobina móvil.

Ventajas

- Mayor rapidez de actuación.
- Menor autoconsumo.
- Menor tamaño.

Inconvenientes.

- Menor robustez.
- Precio mayor.
- Mantenimiento más complejo.
-

RELÉS ELECTRÓNICOS DE PROTECCIÓN

Hasta ahora hemos visto el sistema de protecciones mediante relés electromecánicos, estos relés se utilizaron muchos años con plena eficiencia, pero están tan perfeccionados y no disponen de las ventajas de los relés electrónicos, que puede considerarse su desarrollo y mejoría como acabados, a excepción de su utilización como relés auxiliares, como antes hemos comentado.

De entre los relés electrónicos de protección cabe citar los siguientes tipos:

- ***Relés con tubos electrónicos.***
- ***Relés con rectificadores.***
- ***Relés con transductores. Relés de efecto Hall***
- ***Relés estáticos con transistores (electrónica convencional).***
- ***Relés electrónicos digitales.***

En las últimas décadas, y aprovechando el formidable desarrollo de la electrónica (en los últimos años de la electrónica digital), se han estudiado otro tipo de relés, basados todos ellos en el funcionamiento de dispositivos electrónicos. Cabe destacar sobre todo dos tipos:

- *Relés estáticos con transistores (electrónica convencional)*
- *Relés electrónicos digitales*

Relés con tubos electrónicos.

Fueron los primeros dispositivos que se emplearon, ya hacia el año 1930. A pesar de las mejoras aportadas a los métodos de medida, y a las propiedades de los tubos, prácticamente no resultaron convenientes debido al tiempo necesario para el precalentamiento de los tubos, y sobre todo a su poca vida útil.

Relés con rectificadores

Estos relés, de fabricación alemana (AEG), aportaron como novedad, el empleo de semiconductores en la técnica de protección. Sin embargo, se trataba de relés de cuadro móvil, y por lo tanto el órgano de medida era del tipo *no estático* como en los modernos dispositivos electrónicos de protección.

Relés con transductores

Presentan la ventaja de una separación eléctrica entre el circuito de mando y el circuito de salida. Por su robustez y larga vida resultan muy convenientes para la protección.

Relés de efecto Hall

Basados en el hecho de que ciertos semiconductores desarrollan una tensión transversal cuando están sometidos a un campo magnético. Permiten la multiplicación analógica instantánea de dos magnitudes de medida pero tienen el inconveniente de su elevado coste.

Relés estáticos con transistores (electrónica convencional)

Estos relés son enteramente estáticos, es decir, su elemento de medida está constituido por elementos inmóviles transistorizados. Fueron los sustitutos de los relés electromecánicos clásicos de protección y por sus aplicaciones, los más utilizados, aunque hoy en día han sido desplazados por los relés digitales.

En principio, los relés electrónicos estáticos de protección son convertidores analógicos-binarios con función de medida de señales analógicas de entrada. Generalmente las dos funciones principales de medida de los relés electrónicos convencionales es por comparación de magnitudes y comparación de ángulo entre magnitudes.

Las magnitudes eléctricas de medida, tales como corriente, tensión, desfase, frecuencia, que estos relés deben captar, y los valores que resultan por la diferenciación, integración u otra operación matemática correspondiente, aparecen siempre en la entrada del *Órgano de Medida* bajo la forma de señales analógicas. A la salida de este órgano aparece siempre una señal binaria que puede ser 0 si el relé no debe operar, o bien 1 si debe operar. Para los *Órganos de Mando*, conectados al relé de protección, resultan señales de entrada, que pueden utilizarse con un mínimo de exigencias.

El esquema general de este tipo de relés podemos observarlo en la siguiente figura:

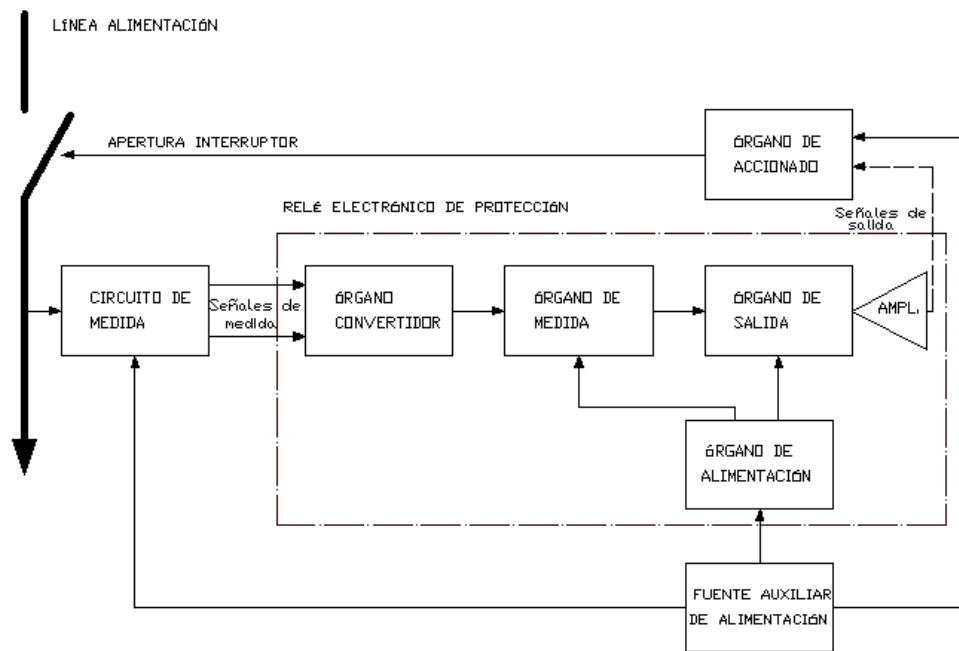


Figura 13. Esquema de relé electrónico transistorizado.

Como podemos ver en la figura13, cada relé de protección está constituido por órganos individuales. Las señales analógicas procedentes del *Circuito de Medida* (transformador de intensidad o de tensión) entran en el *Órgano Convertidor* del relé de protección encargado de transformarlas de tal manera que puedan ser manejadas por el *Órgano de Medida*. Este *Órgano de Medida*, que es el elemento más importante del relé, realiza las operaciones de integración, diferenciación, comparación de las señales analógicas de entrada para establecer si existe o no una falta en la zona de actuación del relé. Este órgano de medida suministra en su salida una señal binaria que puede ser 1 si establece que existe una falta, ó 0 si establece que no existe falta. En el *Órgano de Salida* se amplifica y acondiciona esta señal binaria, y se transmite a los *Órganos de Mando*. Éstos efectúan las maniobras de protección, como operaciones de acoplamiento-desacoplamiento tales como aperturas de interruptores, entrada en acción de un dispositivo de desexcitación rápida, accionamiento de un dispositivo de señalización o dan una orden de verificación a los relés de protección de otra posición. Existe también un *Órgano de Alimentación*, para energizar los órganos de medida y salida. Esta alimentación puede ser recibida de una fuente auxiliar de tensión, o del propio circuito de medida, cuando se trata de un accionamiento por medio de transformadores de intensidad.

Ventajas

Recordemos las exigencias básicas que deben satisfacer los relés de protección:

- *Fiabilidad.*
- *Sensibilidad.*
- *Rapidez.*
- *Selectividad.*

Veamos como cumplen estas condiciones los relés estáticos en comparación con los relés electromecánicos clásicos.

- *Fiabilidad*

Un relé de protección debe garantizar la integridad del objeto que protege. Su funcionamiento debe conservarse durante un determinado período de tiempo. Comparativamente a los relés electromecánicos, los relés de transistores no llevan mecanismos complicados para la transmisión de fuerzas y movimientos, ni ejes, cojinetes etc. Por esta razón no hay problemas de desgaste ni de frotamiento, lo que equivale a una reducción de los trabajos de mantenimiento y vigilancia; en definitiva, mayor fiabilidad.

No se presentan tampoco problemas de trepidación ni de vibraciones, ya que la parte sensible del relé de protección, es decir, su órgano de medida, es estático y funciona sin contactos. Esto es particularmente importante para situaciones especiales, tales como centrales de motores Diesel, regiones expuestas a temblores de tierras etc.

Naturalmente, la ausencia de contactos suprime todos los problemas relacionados con estos elementos, tales como el ensuciamiento en ambientes agresivos, por ejemplo, a causa del sulfuro de plata producido sobre los contactos en las centrales térmicas que queman carbones con fuerte contenido en azufre. No existe el problema de la duración de los contactos; el número y la cadencia de las maniobras quedan elevadas a potencia de diez, con relación a las de los relés clásicos.

- *Sensibilidad.*

Las destrucciones provocadas en el punto del defecto y en las partes de la instalación, por ejemplo, en caso de cortocircuito, son proporcionales a la corriente o al cuadrado de esta corriente.

Conjuntamente con transformadores de medida precisos y potentes, pueden obtenerse relés sensibles con bajo umbral de funcionamiento, equipos de protección con estrechas zonas muertas (relés direccionales, relés de defecto a tierra, relés de protección diferencial transversal etc. También relés para las medidas de cortas distancias (relés de distancia, relés de impedancia etc. Todo ello utilizando dispositivos estáticos transistorizados.

- *Rapidez.*

Las destrucciones de las partes de la instalación afectada por un defecto son también proporcionales a la duración del mismo, que depende, esencialmente, del tiempo de respuesta del interruptor y del relé de protección.

Con un relé de protección transistorizado se puede obtener perfectamente tiempos de respuesta inferiores a medio periodo, incluso para relés con varias magnitudes de influencia. Además, el reenganche de estos relés también es rápido.

- *Selectividad.*

Para asegurar la continuidad de explotación de las partes sanas de la instalación, los relés de protección no deben desconectar más que la parte afectada por el defecto. Pero la selectividad no depende solamente de los relés sino también, y sobre todo, de los transformadores de medida y de sus líneas de conexión.

Indirectamente, los relés transistorizados contribuyen a mejorar la selectividad, a causa de su pequeño consumo propio y, por lo tanto, la pequeña carga de los transformadores a medida; esta circunstancia se hace más patente en los dispositivos de protección por comparación; en condiciones extremas, permiten obtener la selectividad entre los valores mínimo y máximo de la corriente de cortocircuito.

Existen también otro tipo de ventajas de los relés transistorizados sobre los relés electromecánicos; vamos a enumerar algunas de ellas:

- Obtención de características determinadas, imposibles de obtener con los relés electromecánicos.
- Reducción de volumen, en ciertos casos.
- Posibilidad de utilizar transformadores de medida de tipo diferente.
- Posibilidad de obtener muy alta precisión.
- Los órganos de salida, que permiten mandar directamente elementos lógicos, hacen posible la construcción y la cooperación de centrales completas con mandos sin contactos, y con un mínimo de aparatos.
- Reducción del coste de producción y los tiempos de mecanizado debido a la supresión de los numerosos órganos mecánicos de los relés electromecánicos. La fabricación en grandes series de los relés estáticos transistorizados permite obtener un precio comparable al de los relés clásicos.
- Eliminación de los errores de cableado y racionalización de la producción en serie por el empleo de circuitos impresos.

Relés electrónicos digitales

La aparición en el mercado de los primeros microprocesadores, a finales de los años sesenta, impulsó a los grandes fabricantes de protecciones a diseñar sistemas basados en microprocesadores y aprovechar los desarrollos en tecnología de comunicaciones por fibra óptica que transmiten gran cantidad de información a alta velocidad. Las primeras aplicaciones fueron en las protecciones de extremos de línea por ser las más complejas. Posteriormente se han ido extendiendo a otros campos y en la actualidad, es raro el nuevo diseño que no integre microprocesadores en cualquiera de las funciones o equipos de protección.

El esquema básico de las protecciones digitales es muy parecido al de las protecciones estáticas, la diferencia fundamental es que las protecciones estáticas realizan las operaciones de medida (integración, comparación) de forma analógica con valores continuos, mientras que las protecciones digitales la realizan por medio de unos algoritmos que operan con los valores instantáneos muestreados de la señal de entrada. Para ello es necesario disponer de una unidad que realice un muestreo de esta señal y de un convertidor analógico-digital.

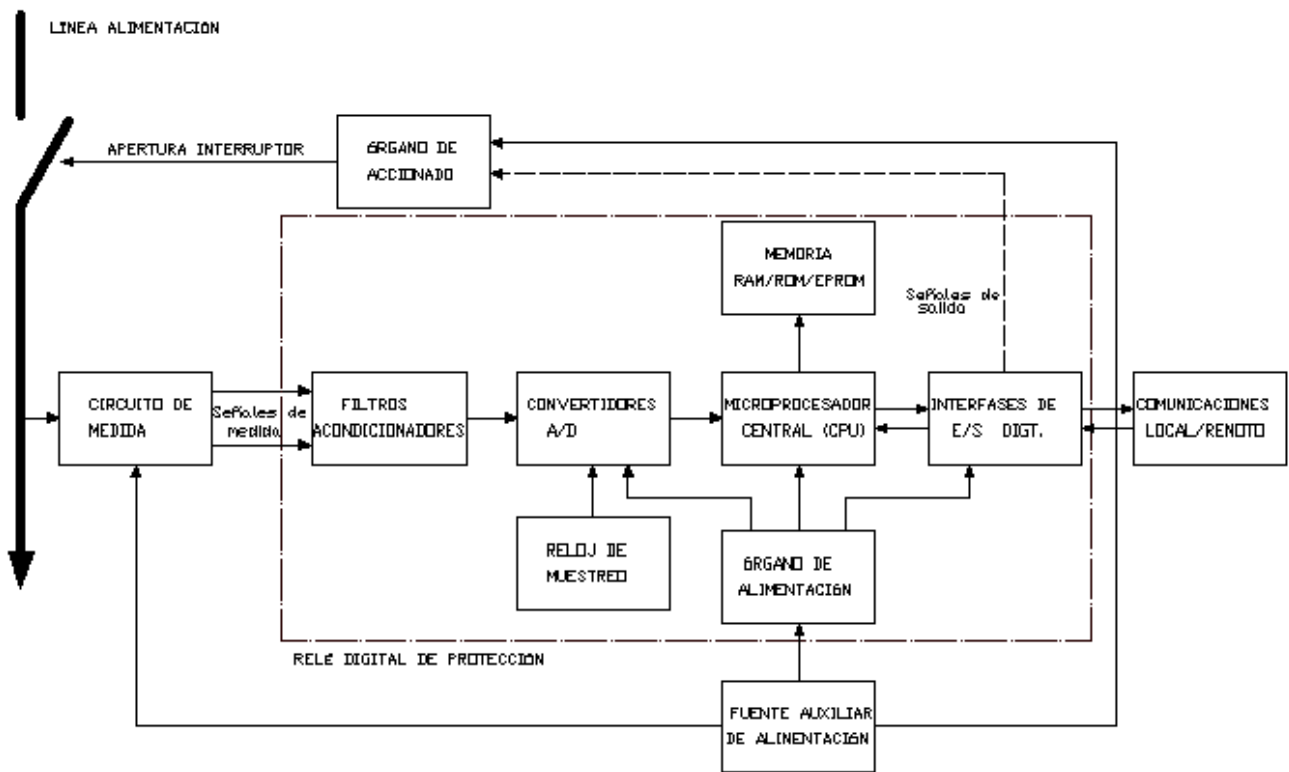


Figura 14. Esquema de relé electrónico digital.

En la figura 14 se observa el esquema de bloques de la arquitectura de un relé digital. Las señales de las intensidades y tensiones procedentes del *Circuito de Medida* (transformadores de intensidad y tensión), se acondicionan en unos circuitos acondicionadores analógicos, con eliminadores de transitorios, *filtros antialiasing* etc, antes de ser transformadas en señales digitales a través de los *Convertidores Analógicos-Digitales A/D*, para posteriormente ser almacenadas a la espera de ser utilizadas en *Memorias RAM, ROM, EPROM, FLASH* etc. La conversión analógica-digital se hace normalmente por muestreo de las señales analógicas a través de un *Reloj de Muestreo* a unas frecuencias comprendidas entre 10/30 veces la frecuencia nominal de la red. Las señales digitalizadas se procesan en una unidad central *CPU(Micoprocesador)*, utilizando algoritmos de cálculo y dando como resultado la salidas digitales correspondiente a través de una *Interfase de Salida* hacia el *Órgano Accionado* y el *Canal de Comunicaciones*.

El algoritmo es el corazón de la función de protección digital, habiéndose desarrollado y publicado un gran número de ellos. Hoy en día se sigue investigando en

este campo desarrollando nuevos algoritmos, ya que la bondad de los mismos se verá reflejada en las características y calidad de las protecciones digitales que los tengan incorporados en sus diseños.

Ventajas

- En primer lugar, lo aplicado a los relés electrónicos transistorizados.
- Facilidad para incorporar autodiagnósticos y funciones automáticas de inspección, lo cual representa una gran mejora en la fiabilidad y la seguridad del sistema de protecciones. La supervisión continua permite la verificación de los circuitos de la CPU, memorias, dispositivos de ajuste y elementos de entrada y salida.
- Capacidad de almacenamiento de información sobre eventos y ajustes, que puede ser tratada y monitorizada de forma local en la instalación por medio del *HMI (Interfaz Hombre Máquina)*, o de forma remota desde un centro de operación del sistema a través de las *RTU (Unidad Remota de Telecontrol)*.
- Mejora de la flexibilidad y la aplicación. Se pueden normalizar relés con diferentes funciones que compartan el mismo *hardware*. Una aplicación software determina la función a realizar por el relé. Actualmente están completamente desarrollados los relés de protección *multifunción*.
- Mayor simplicidad. La complejidad de los actuales sistemas eléctricos requieren cada vez una arquitectura hardware más extensa y compleja en los relés electrónicos convencionales. A través de los microprocesadores en los modernos relés digitales, la arquitectura hardware queda reducida de forma considerable.
- Reducción del conexionado de los equipos. La posibilidad de sistemas de datos jerarquizados en los modernos microprocesadores permite transmitir las distintas señales por el mismo canal de comunicación. La utilización de los modernos sistemas de comunicación y *Buses de Campo* tales como *Profibus*, *Modbus*, *Devicenet*, *Ethernet*, conllevan la reducción de cableado de equipos, labores de mantenimiento y mejora las tareas de control y protección.
- Obviamente, debemos tener en cuenta que las ventajas de los relés electrónicos estáticos que antes se han comentado, se aplican también para este tipo de relés.

No obstante quedan aspectos que pueden y deben ser mejorados; así, en el caso de las protecciones; se debe intensificar la investigación y el desarrollo con tecnología digital nuevos esquemas y algoritmos de protección que satisfagan plenamente los requisitos de los actuales sistemas y redes eléctricas.

Respecto al hardware, las distintas áreas de trabajo se basan en el estudio de la reducción del tamaño de los equipos y en el empleo de modernos microprocesadores y componentes electrónicos capaces de aumentar su velocidad de muestreo y procesamiento de datos. También en el desarrollo de nuevos tipos de transductores y

elementos de medida con una baja disipación de potencia y en tecnologías para la inmunidad eléctrica y electrónica ante perturbaciones (ruidos, sobretensiones, interferencias) de los equipos.

Actualmente, en el campo de las protecciones se están desarrollando una nueva clase de relés digitales y dispositivos auxiliares inteligentes (IED's), capaces de desarrollar aplicaciones de alto nivel en el entorno de las comunicaciones y tratamientos de datos. Se está trabajando y de forma muy intensa, tanto en lo relacionado internamente al relé, como en lo externo a él, todo lo que conlleva la integración, automatización, sincronización y arquitectura de los sistemas de protecciones, y en la configuración de modernos sistemas de comunicaciones para grandes instalaciones eléctricas; subestaciones y centrales de generación.

En estos días, se está trabajando de forma muy intensa en nuevos protocolos de comunicaciones, cabe destacar El estándar de comunicaciones *IEC 61850*, que establece la capacidad de interoperabilidad total entre los equipos de protecciones que comprenden la instalación, tanto los propios relés como los elementos auxiliares, de cualquier fabricante, a través de un bus *Ethernet*. Permite simplificar la configuración de los equipos individualmente como la comunicación conjunta, las aplicaciones de alto nivel y una mejora en supervisión y control remota. Este sistema de automatización para las instalaciones eléctricas (*Substation Automation System*) parece a priori ser el futuro desarrollo de los modernos sistemas de protecciones.

2.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE BARRAS.

La protección tradicionalmente aceptada para la posición de barras de una subestación eléctrica contra faltas que se produzcan en las mismas es la protección diferencial de barras (87B).

Históricamente las protecciones de barras que más se han utilizado son:

- ***Protección diferencial de corriente con margen porcentual o de Baja Impedancia.***
- ***Protección diferencial de Alta Impedancia.***
- ***Protección diferencial por transductores lineales.***
- ***Protección diferencial con estabilización.***
- ***Protección diferencial con relé electrónico (BUS1000 de General Electric).***

A continuación procederemos a detallar brevemente cada una de estas protecciones:

Protección diferencial de corriente con margen porcentual o de baja impedancia

La protección integrada por relés convencionales de característica diferencial con margen porcentual se ha utilizado generalmente en aquellas barras de subestaciones con tensiones no muy elevadas; Media Tensión, donde la velocidad exigida para despejar las faltas no es requisito esencial, en contra a las subestaciones de Alta o Muy

Alta Tensión, donde la velocidad de actuación es fundamental para el buen funcionamiento de la red, los componentes y la aparamenta que la constituye. En este tipo de aplicación se pueden introducir demoras en los tiempos de actuación, con el fin de evitar operaciones de disparo indebidas cuando se producen faltas externas al área de actuación de la protección.

Este tipo de protección está completamente en desuso debido a los problemas de selectividad que conlleva. Estos problemas estaban supeditados a la inherente pérdida de precisión de los transformadores de corriente auxiliares ante cortocircuitos producidos fuera de la zona de protección de las barras debido a la saturación de los núcleos magnéticos de los transformadores de intensidad de las líneas que alimentan la falta, y también, por la posible existencia de componentes de corriente asimétricas y desequilibradas. Este hecho hace que la intensidad en el circuito diferencial esté erróneamente descompensada, produciendo una actuación no deseada.

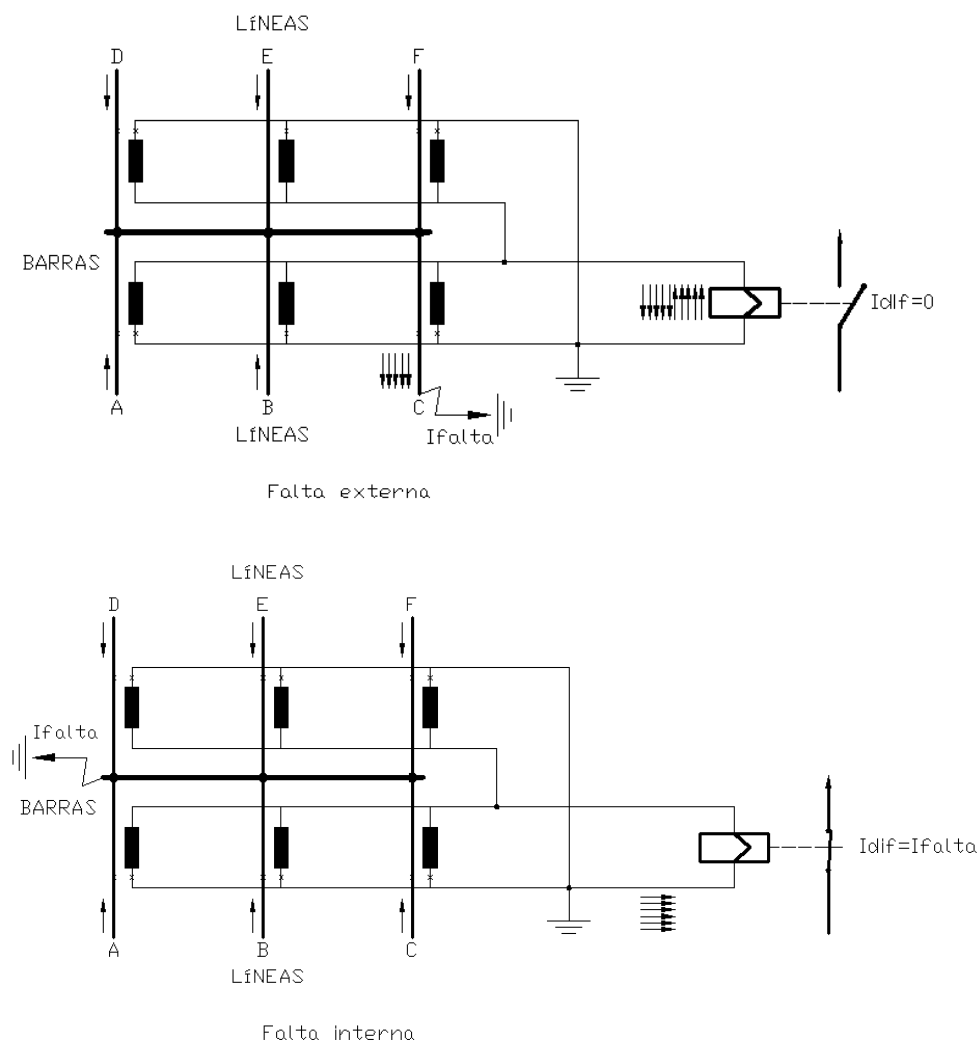


Figura 14. Protección de Baja Impedancia.

Para evitar estas posibles falsas operaciones sería preciso desensibilizar el relé, o bien, añadir un tiempo de demora como antes comentábamos, condiciones éstas no adecuadas para el buen funcionamiento del conjunto del sistema

Protección diferencial de Alta Impedancia

La protección diferencial de Alta Impedancia es de alta velocidad, diseñada para operar de forma selectiva, incluso cuando se saturan uno o más transformadores de intensidad convencionales.

En este esquema de protección, el órgano de medida es un relé de tensión (función 59) con un varistor de ajuste del orden de 1.000 a 3.000 Ω , y en algunos casos un filtro para eliminar la componente de continua debida a la falta ocasionada. Este relé está conectado en paralelo con los secundarios de todos los transformadores de intensidad convencional de idéntica relación de transformación y características.

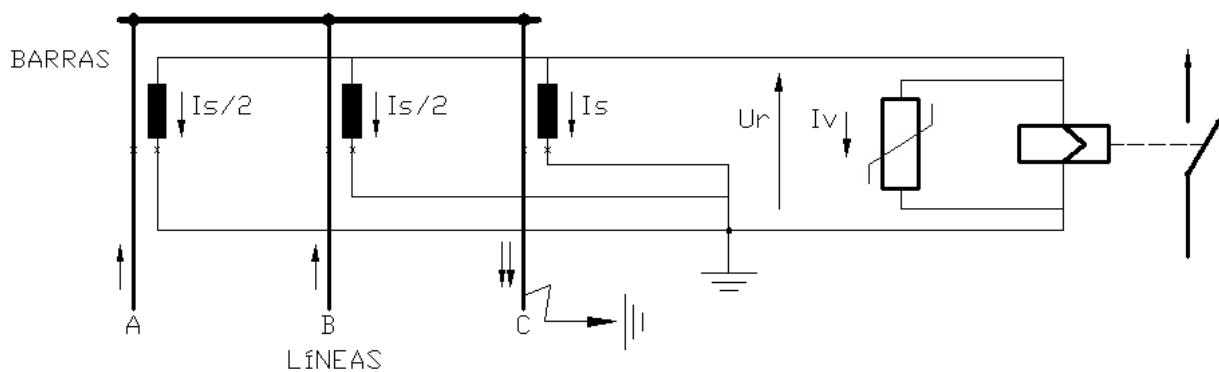


Figura 15. Protección de Alta Impedancia.

La discriminación o selectividad entre faltas internas o externas a la zona de protección se lleva a cabo en relación a la magnitud de tensión que aparece en bornas del relé de tensión.

- En faltas externas, el circuito secundario de un transformador totalmente saturado puede representarse sólo por su resistencia total en corriente continua Protección diferencial de alta impedancia.
- En faltas internas, el circuito secundario de los transformadores de intensidad sin carga puede representarse por una impedancia de magnetización predominante inductiva y con una elevada constante de tiempo.

Por lo tanto:

En caso de una falta interna, aparecerá una tensión motivada por la elevada resistencia del relé ($\approx 2.000 \Omega$) que para los transformadores de intensidad es equivalente a circuito abierto. Para limitar esta tensión actuamos sobre el varistor en paralelo con el relé. Por lo tanto, simplemente hay que ajustar el umbral de actuación del relé para una tensión superior a la que se produce en una falta externa en la hipótesis de completa saturación del transformador de intensidad del circuito en defecto.

En caso de una falta externa, la tensión en bornas del relé diferencial sería teóricamente nula, pero aparecerá una cierta tensión debida a errores de transformación y a la saturación de los transformadores.

El transformador de intensidad de la línea en falta, al estar saturado, se comporta como una resistencia, y por lo tanto su circuito equivalente sería el siguiente:

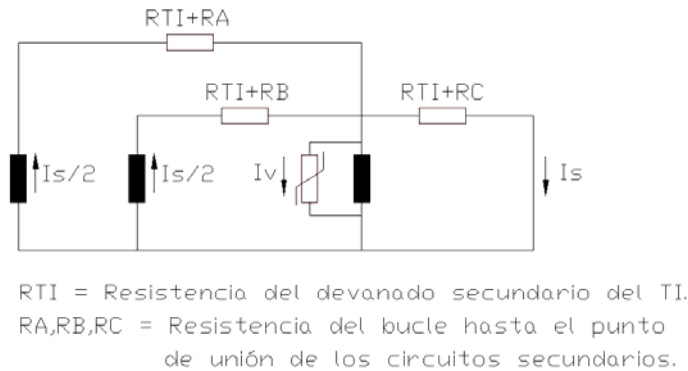


Figura 16. Circuito equivalente de TI saturado.

La tensión en bornas del relé será:

$$U_R = I_S \cdot (R_{TI} + R_C)$$

Este valor será el de referencia límite para proceder al ajuste del relé. Consecuentemente, el ejute del relé diferencial, para que se mantega estable la protección para faltas externas, será función de la máxima intensidad de cortocircuito y de la resistencia tanto de los transformadores de intensidad como del bucle con mayor resistencia.

La sensibilidad de la protección para faltas internas será:

$$I_S \min = \frac{U_R}{R_R} + (I_V + N \cdot I_e)$$

Donde:

- $N \rightarrow$ Número de posiciones conectados a la barra.
- $I_C \rightarrow$ Intensidad de excitación secundaria que toma el TI a la tensión de ajuste del relé.
- $R_R \rightarrow$ Resistencia interna del relé.
- $U_R \rightarrow$ Tensión de ajuste del relé.
- $I_V \rightarrow$ Intensidad que toma el varistor a la tensión de ajuste del relé.

La sensibilidad mínima del relé diferencial será función del ajuste del relé, de las características de los TI y del número de posiciones conectadas a la barra.

Podemos apuntar, al tratar la saturación de los transformadores de intensidad, que los relés diferenciales de barras de alta impedancia con diseño de electrónica convencional, que aprovechan el efecto similar de cortocircuitar el secundario que se

produce en el transformador de intensidad sometido a la corriente de falta externa y así poder discernir de forma selectiva y automática ante faltas internas o externas. En cambio, esta condición no puede utilizarse en funciones diferenciales de diseño digital, por lo que se hace necesario el empleo de algoritmos que se realicen con elevada rapidez esta selectividad entre faltas internas o externas. Esta discriminación se deberá realizar antes de que se sature el transformador de intensidad, en ocasiones, en tiempos no superiores a los 3 ms. de producirse la falta.

En general, podemos señalar que una de las protecciones más utilizadas en protecciones de barras son las de alta impedancia, por cumplir con el requisito de ser de alta velocidad y poder utilizar transformadores de intensidad convencionales.

Protección diferencial por transductores lineales

En este tipo de protección diferencial se utilizan transductores lineales de intensidad, con núcleo de aire, con lo cual se eliminan completamente los problemas de errores por saturación de los núcleos magnéticos. Los transductores lineales utilizados tienen un error de precisión del orden del 1 %, y como en el caso de Alta Impedancia, el relé de medida es un relé voltimétrico, el cuál está conectado en serie con los secundarios de los transductores.

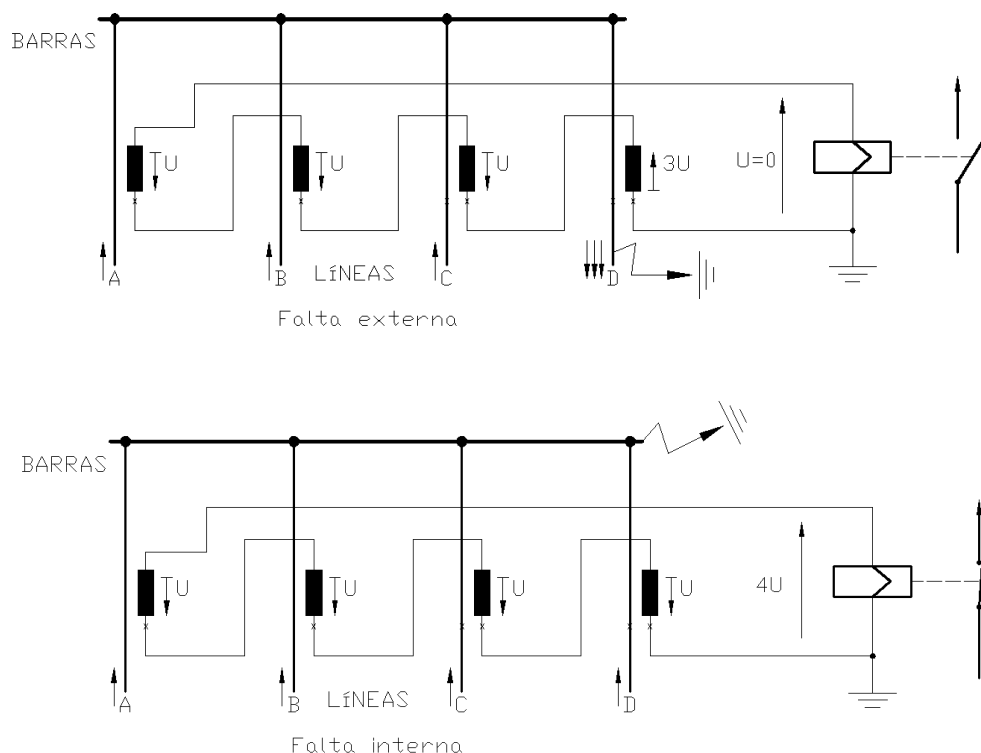


Figura 17. Protección por transductores lineales.

En caso de una falta externa, la tensión que aparecerá en bornes del relé diferencial es prácticamente nula y estará originada por los posibles errores de medida de los mismos transductores. La peor situación se producirá cuando el transductor de la

línea de salida en defecto tenga el máximo error de clase en un sentido y todo el resto de alimentadores lo tengan en sentido contrario.

En este caso, la tensión que aparecerá en bornas del relé, para la máxima intensidad de cortocircuito resultará:

$$U = I_{cc} \cdot 2 \cdot e \cdot R_t$$

Donde:

I_{cc} → Máxima intensidad de cortocircuito.

e → Error del transductor en p.u

R_t → Relación de transformación del transductor en V/A

En consecuencia, la máxima tensión que aparecerá en caso de falta externa y por tanto el valor mínimo de ajuste del relé será igual a la tensión correspondiente a la máxima intensidad de defecto multiplicadas por dos veces el error.

Si la falta es interna, la tensión que aparecerá en bornas del relé será la suma de tensiones generadas por los transductores, y suponiendo que el relé se ha ajustado con un factor de seguridad K respecto a la tensión máxima para defectos externos, la protección será capaz de detectar faltas de:

$$I_{min} = I_{cc} \cdot K \cdot 2 \cdot e$$

Este esquema de protección diferencial es muy simple y no se ve afectado por el número de terminales, como en alta impedancia. Su tiempo de actuación puede ser muy corto y es inmune a los fenómenos de saturación. No obstante, presenta el inconveniente de precisar la instalación de transductores lineales para su uso exclusivo.

Protección diferencial con estabilización

La principal ventaja de la protección diferencial de barras con estabilización es que puede alimentarse de transformadores de intensidad normales, de diferentes relaciones de transformación, que pueden a su vez ser utilizados, con ciertas restricciones, para otras protecciones.

Cuando existen transformadores de medida de diversas relaciones de transformación, se deberán instalar transformadores auxiliares que igualen las relaciones a la relación más elevada de todos los transformadores de intensidad existentes.

Un sistema de estabilización comúnmente utilizado consiste en llevar al relé de medida, además de la suma vectorial de las intensidades secundarias para el elemento motor, la suma aritmética de sus valores absolutos que actúan como elemento antagonista.

En el transformador TM se tiene la suma vectorial de las intensidades secundarias. Esta suma es convertida en CM en una intensidad de continua, obteniéndose en R_2 una tensión UM proporcional a la intensidad diferencial.

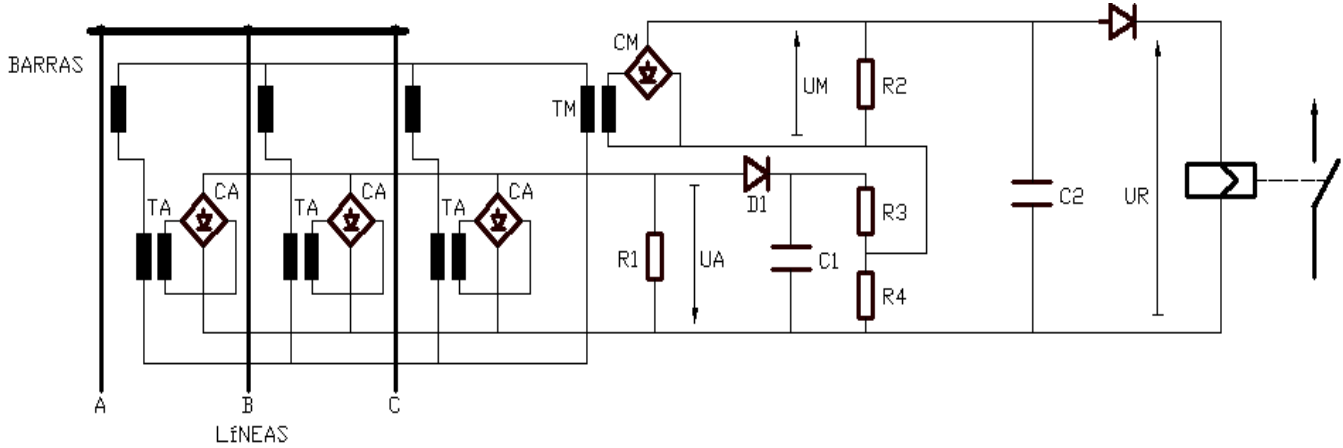


Figura 18. Protección con estabilización.

Las intensidades de todos los terminales alimentan, además, a través de los transformadores TA , los puentes rectificadores CA ; su salida, proporcional a la intensidad, provoca una caída de tensión UA en R_1 , que será proporcional a la suma aritmética de las intensidades. Esta tensión de estabilización, a través del diodo D_1 , carga el condensador C_1 de forma inmediata. Al disminuir UA , C_1 se descargará a través de $R_3 - R_4$ con un cierto retardo. La relación entre R_3 y R_4 es la que establece el grado de estabilización de la protección. La tensión aplicada al relé, U_R , será $UM - UA$, y en el caso de que la diferencia sea positiva, podrá funcionar el relé diferencial, según la curva de actuación indicada:

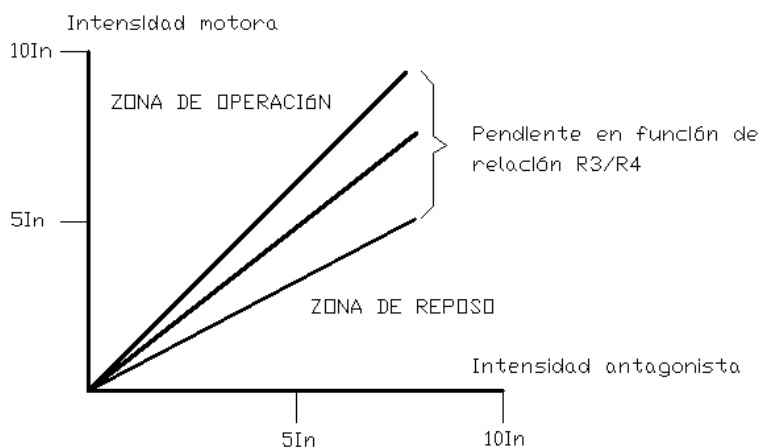


Figura 19. Curva de operación de relé diferencial con estabilización.

Además del criterio de estabilización descrito, es común que las protecciones diferenciales de barras para redes de A.T. y M.A.T. incorporen otros criterios que deben cumplirse además de la actuación del elemento diferencial. Uno de los criterios es incorporar un elemento de comparación de fases y permitir el disparo sólo cuando no exista ningún terminal cuya corriente esté en oposición de fase con las otras. Para ello se convierten las ondas senoidales de cada terminal en ondas rectangulares y se comprueba que no existan pulsos negativos cuando los demás son positivos y viceversa.

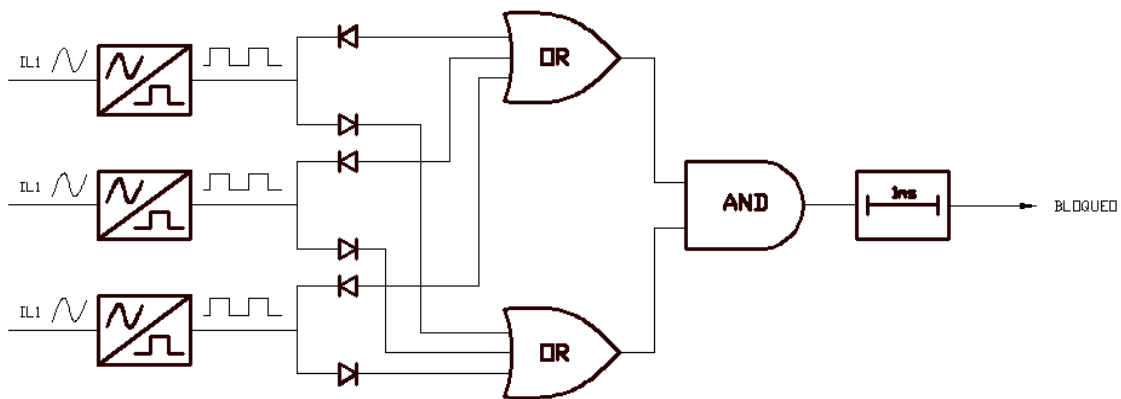


Figura 20. Esquema de puertas lógicas para comparación de fase.

En otros diseños de relés diferenciales de barras se realiza la medida tanto para semionda positiva como para la negativa, y para que se permita el disparo son necesarias condiciones de disparo en dos semiondas consecutivas. Con este criterio se trata de eliminar disparos incorrectos por faltas exteriores con un elevado contenido de componente continua.

Este último criterio puede mejorarse por la aplicación de una unidad de medición rápida, que en un tiempo inferior a los 2 ms, y por tanto los transformadores de intensidad aún no saturados, detecta si la falta es interna o externa y, en el primer caso, conmuta la protección durante 40 ms. Para que realice disparo con medición de una sola semionda.

En las protecciones de barras con estabilización que incorporan otros criterios de seguridad en el disparo, es usual que tengan un único elemento de medida, lo que obliga a instalar transformadores mezcladores en la entrada, de lo que resultan distintos valores de actuación según el tipo de falta.

En la figura 21 se muestra el esquema para una fase de una variante de protección diferencial de barras con estabilización que utiliza en su diseño algunos de los principios de las protecciones de alta impedancia. Se trata de una protección diferencial de barras con frenado:

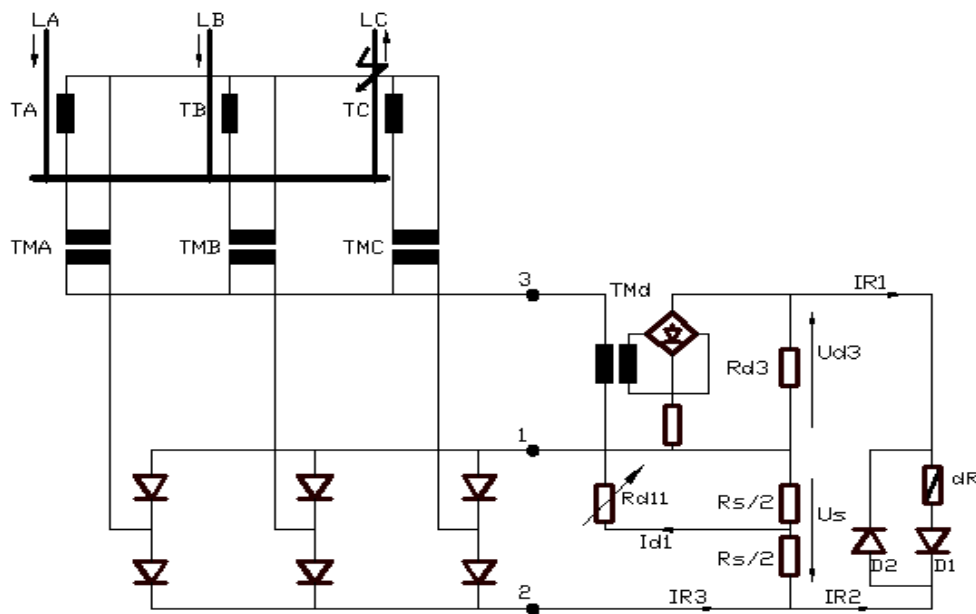


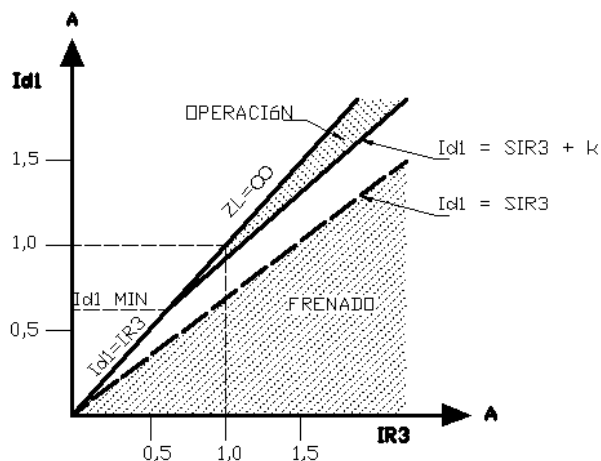
Figura 21. Protección con estabilización y frenado.

Las intensidades secundarias de los transformadores de intensidad alimentan transformadores auxiliares que sirven para igualar las relaciones de transformación. Las salidas de estos últimos se conectan a una serie de diodos cuya salida (bornas 1 y 2) se obtiene la suma de todas las intensidades. En caso de servicio normal o defecto externo, la intensidad de entrada será igual a la de salida y por tanto se obtiene una corriente diferencial mínima. Las intensidades de paso originan en las resistencias $R_{S/2}$ una tensión de frenado U_s que asegura la estabilidad del relé diferencial.

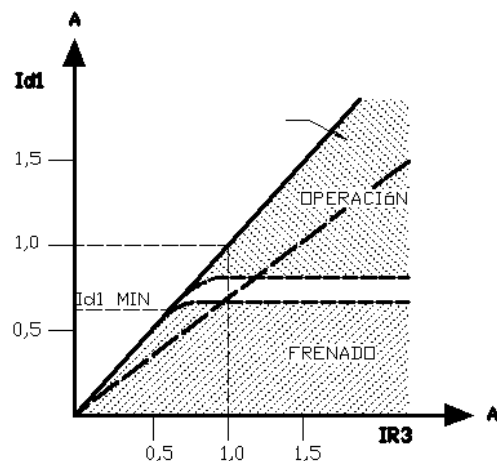
Al producirse una falta interna o una falta externa severa, que sature el transformador de intensidad de la línea en falta, aparecerá una intensidad diferencial de desequilibrio I_{d1} , la cuál pasa a través de la resistencia de ajuste R_{d11} y de un transformador de intensidad T_{Md} .

La intensidad secundaria de este transformador auxiliar es rectificada en el puente de doble onda y produce una caída de tensión U_{d3} en la resistencia R_{d3} . En el caso de que esta tensión sea superior a la de frenado, la intensidad I_{R1} será positiva y actuará el relé diferencial d_R . En caso contrario, la intensidad I_{R2} tendría sentido contrario y pasaría a través del diodo D2 bloqueando la actuación del relé diferencial. El tiempo de actuación del relé diferencial debe ser del orden de 1 a 3 ms. para asegurar el funcionamiento de la protección diferencial aun en el caso de que se saturen rápidamente los transformadores de intensidad de línea.

Con este tipo de protección diferencial de barras se obtiene un gran frenado para las faltas externas y un frenado despreciable para las faltas internas, debido al efecto shunt de los transformadores de intensidad pasivos.



Características de frenado para faltas externas



Características de frenado para faltas internas

Figura 22. Curvas de operación relé diferencial con estabilización y frenado.

Protección diferencial con relé electrónico (BUS1000 de General Electric).

Para estudiar el funcionamiento de este tipo de protección hemos dispuesto en el apartado de “*Documentación Técnica*” un folleto explicativo facilitado por General Electric donde quedan resumidas la características técnicas y de funcionamiento del relé diferencial de protección de barras BUS1000 de General Electric, relé que constituye el sistema tradicional de protección de barras utilizado por Unión Fenosa Distribución para subestaciones tipo “Cerro de la Plata”.

2.5 PROTECCIONES DE DISTANCIA.

Vamos a realizar una breve introducción a las protecciones de distancia y sus características más destacables. Recordemos que fueron las señales de este tipo de relés las que hemos utilizado para realizar nuestro sistema de protección de barras.

Las protecciones de distancia son el método más utilizado hoy en día para la protección de líneas de transporte. El principio de operación de este tipo de dispositivos es una unidad de medida que actúa en función del valor de la impedancia por fase del elemento protegido (cociente entre la tensión y la intensidad medida), como la impedancia es de alguna manera una función lineal de la longitud de la línea, ha hecho que a este tipo de protecciones se les denomine “de distancia”.

Este tipo de sistema de medida de impedancia proporciona un buen medio para discriminar entre faltas y condiciones normales de funcionamiento y también para discernir entre faltas que se produzcan dentro de un área de protección concreto, de aquellas que se produzcan en otra zona del sistema, evitando en gran manera los inconvenientes que presentan los dispositivos de sobreintensidad.

Lo más relevante es conocer los fundamentos de este tipo de relés. Para ello se parte del estudio del comportamiento de un circuito monofásico simple:

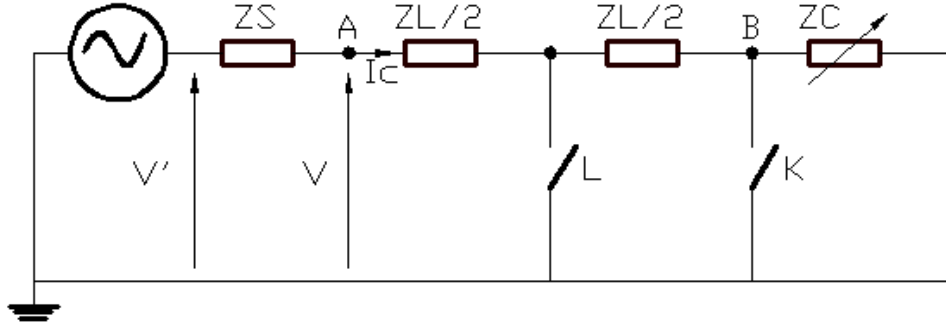


Figura 23. Comportamiento de un sistema en falta.

En condiciones normales, circulará una corriente de carga I_c determinada por:

$$I_c = \frac{V'}{Z_s + Z_L + Z_c} = \frac{V}{Z_L + Z_c}$$

Al cerrar el interruptor K, se provoca un cortocircuito en el extremo B, la corriente del cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{V'}{Z_s + Z_L} = \frac{V}{Z_L}$$

Al cerrar el interruptor L, se provoca un cortocircuito en el centro de la línea A-B, la corriente del cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{V'}{Z_s + \frac{Z_L}{2}} = \frac{V}{\frac{Z_L}{2}}$$

En todo momento, el cociente V/I resulta ser la impedancia del circuito vista desde A, y obviamente, para faltas entre A y B este cociente es directamente proporcional a la distancia desde A hasta el punto de cortocircuito. Por consiguiente, resulta fácil conocer si existe o no una falta en la línea midiendo la impedancia desde el punto A (punto de medida) cuando:

$$\frac{V_A}{I_A} < Z_L$$

Si la potencia de la fuente de alimentación, la carga conectada y la tensión fuesen constantes, también lo sería I_c , y por lo tanto un relé de sobreintensidad ajustado a esta corriente bastaría para proteger el circuito en caso de defecto. Sin embargo, en la red de transporte lo único que permanece invariable es el valor de la impedancia de los elementos no rotativos, por lo que los relés de distancia son los más indicados para la protección de líneas.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE MEDIDA DE RELÉS DE DISTANCIA

Los valores de operación del relé de protección de distancia son diferentes atendiendo a la característica de su sistema de medida.

Las características más importantes de los relés de protección de distancia son las siguientes:

- *Característica de mínima impedancia.*
- *Característica de mínima impedancia direccional.*
- *Característica Mho.*
- *Característica Mho off-set.*
- *Característica de mínima reactancia.*
- *Característica de mínima reactancia direccional combinada con mínima impedancia.*
- *Característica poligonal.*

Característica de mínima impedancia

La medición de la impedancia vista desde un punto de la red hoy en día se realiza mediante dispositivos electrónicos comparadores, pero puede realizarse también mediante un relé de copa de inducción, en el que el par antagonista es proporcional a la tensión en el punto de medida y el par motor a la intensidad que recorre el elemento protegido. El ajuste del relé se consigue variando el número de espiras de la bobina motora, de forma que el par motor y el antagonista estén equilibrados en el momento que el cociente entre la tensión y la intensidad aplicadas al relé sea igual a la impedancia de ajuste Z_M .

Al producirse un cortocircuito aumenta la intensidad y disminuye la tensión, por lo que también disminuye la impedancia. El relé de distancia operará para valores de impedancia comprendidos en la zona interior a la circunferencia de radio Z_M .

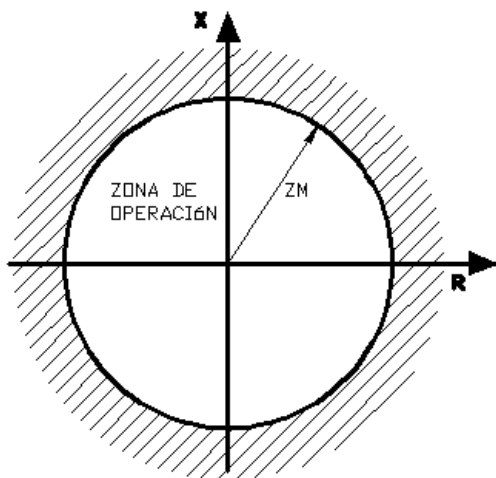


Figura 24. Característica de mínima impedancia.

Característica de mínima impedancia direccional

La característica anterior no es direccional, y por lo tanto, ante una falta externa en dirección contraria a la línea, si el valor de la impedancia medida es inferior al ajuste, se producirá un disparo incorrecto.

Si a la unidad de impedancia se le añade una unidad direccional que controle a la primera, se puede obtener una característica de actuación como la indicada:

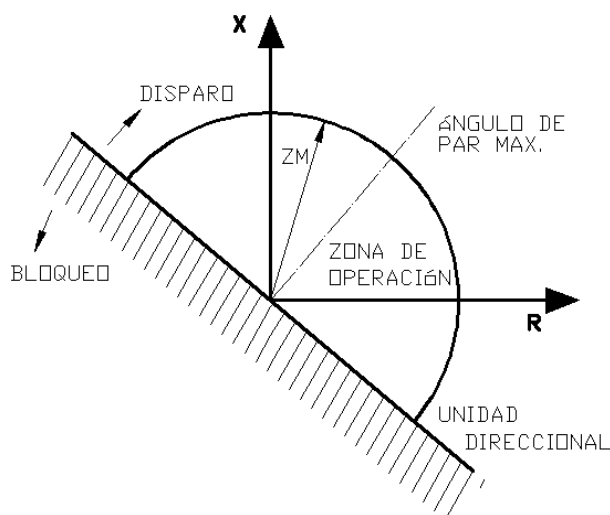


Figura 25. Característica de mínima impedancia direccional.

El elemento detector de la direccionalidad debe ser lo suficientemente sensible para dar una medida correcta de la dirección de la falta en cualquier condición. El caso más desfavorable lo constituye el cortocircuito en bornes de los transformadores de medida, en este caso, $V \approx 0$, con lo que el elemento direccional pierde la tensión de polarización y el elemento de balanza pierde el par antagonista.

Las características de impedancia, tanto direccionales como no direccionales no se emplean generalmente en los elementos de medida de las protecciones de distancia, y su uso queda restringido a funciones de arranque y aplicaciones especiales.

Característica Mho

Este tipo de característica combina las características de los elementos de mínima impedancia y direccional, se produce un desplazamiento de la característica hasta el origen R-X en el sentido de la línea, y de esta forma se obtiene una zona de operación más acorde y ajustada a la naturaleza de la línea protegida, evitando actuaciones indebidas. Los modernos relés de distancia electrónicos pueden conseguir características Mho muy diversas mediante circuitos comparadores según las especificaciones del sistema.

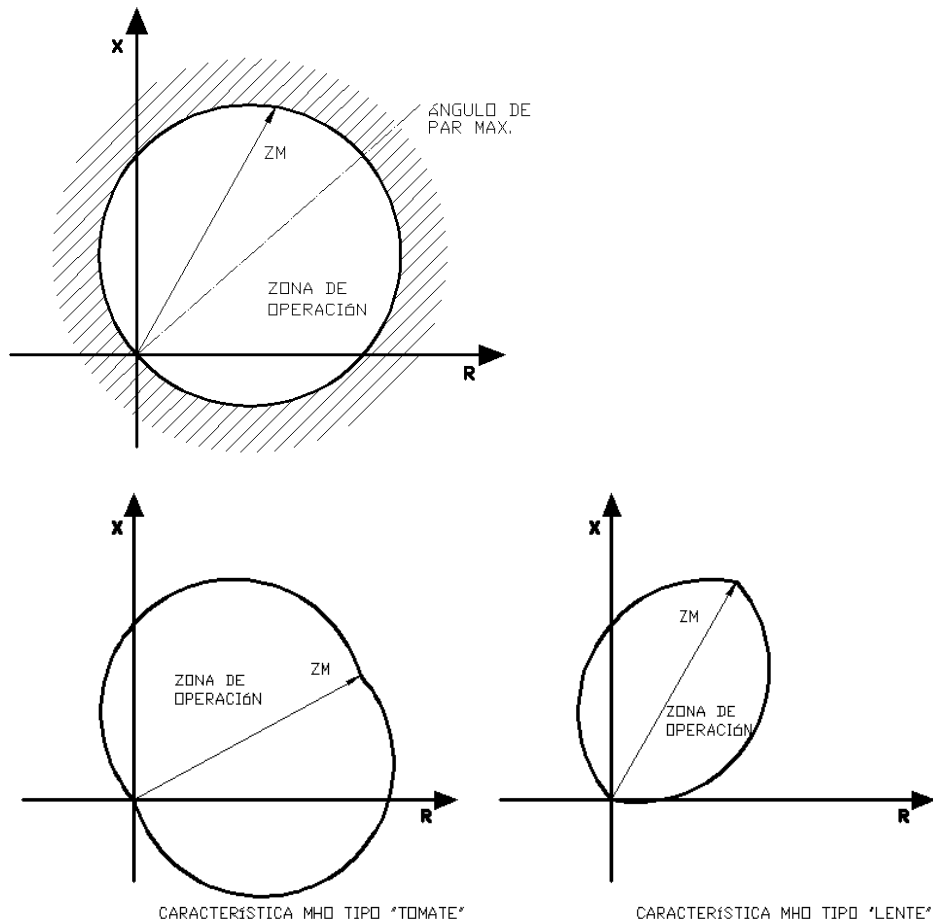


Figura 26. Característica Mho.

Característica Mho off-set

La característica Mho off-set es una variante de la Mho, la diferencia radica en que no está situada en el origen R-X, sino que está desplazada una distancia de off-set de ajuste, permitiendo un mayor alcance en resistencia.

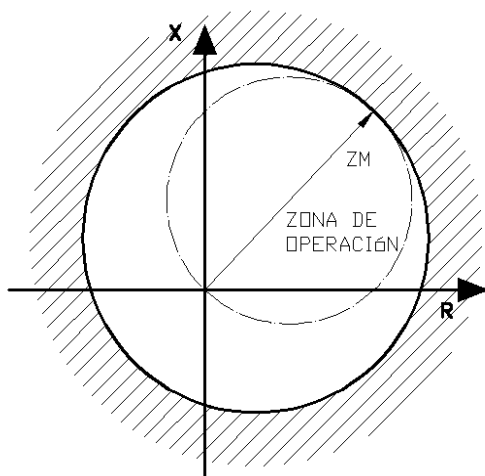


Figura 27. Característica Mho off-set.

Característica de mínima reactancia

La impedancia medida por un relé de distancia es la suma de la impedancia propia de la línea y otras magnitudes resistivas, tales como la posible resistencia de arco. La zona de operación de este tipo de característica es independiente de la resistencia medida, por lo tanto, será independiente de la resistencia de falta.

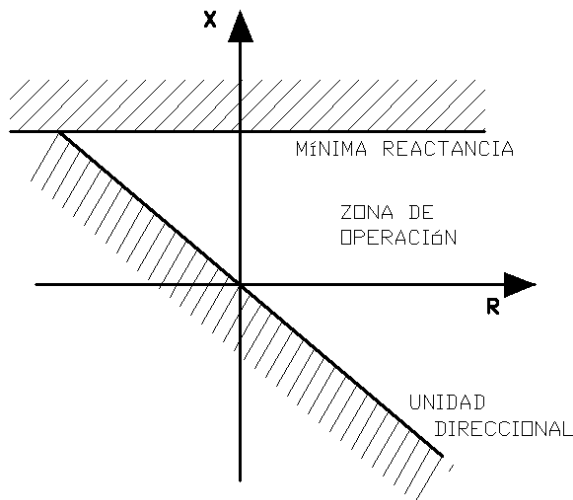


Figura 28. Característica de mínima reactancia.

Característica de mínima reactancia direccional combinada con mínima impedancia

La característica de operación del relé de mínima reactancia con control direccional es una característica de tipo “abierto”, sin limitación sobre el eje de resistencia como en el caso anterior. La impedancia de línea Z_c es predominantemente resistiva, por lo que debe incluirse algún otro condicionante que evite los disparos indeseados. Una solución es añadir un elemento de mínima impedancia.

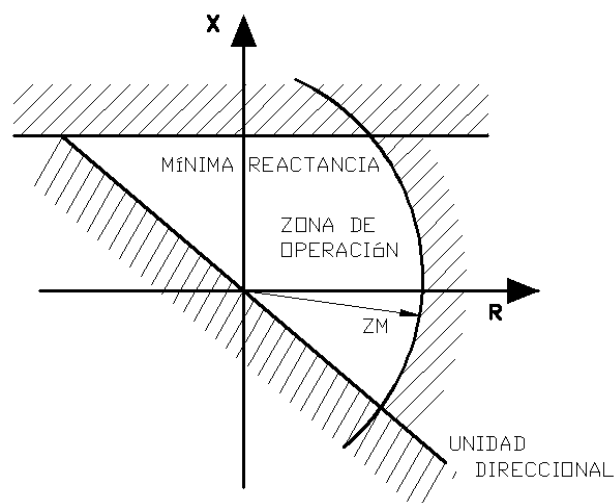


Figura 29. Característica de mínima reactancia direccional combinada con mínima impedancia.

Característica poligonal

Este tipo de característica es muy común en los modernos relés de distancia electrónicos digitales. Con este tipo de característica no hace falta incluir una unidad de mínima impedancia para limitar la característica de disparo del eje resistivo. Este tipo de característica permite un esquema de ajuste muy flexible, consiguiendo modificar de forma independiente resistencia y admitancia, adecuándose completamente a las necesidades de protección y naturaleza de la instalación.

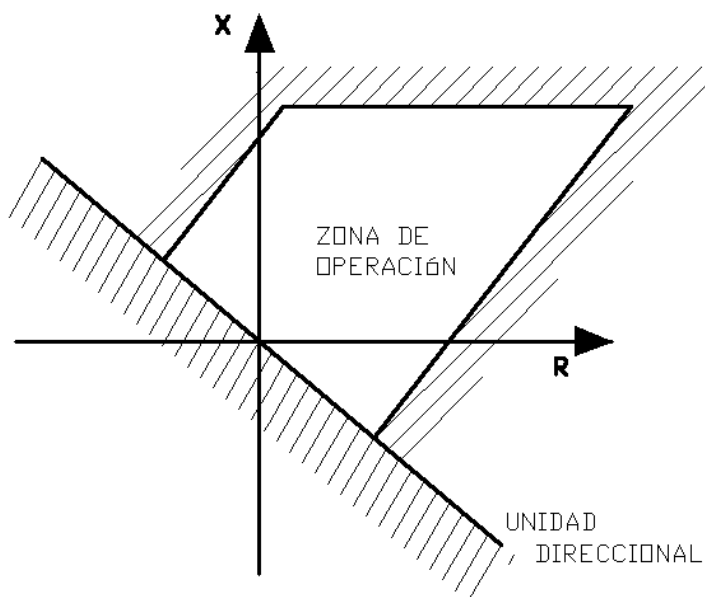


Figura 30. Característica poligonal.

ESCALONES DE MEDIDA

Para conseguir una cobertura total de la línea protegida sin que se planteen problemas de selectividad ante faltas externas, sí como para conseguir protección de reserva de las líneas salientes de la estación remota, los relés de distancia disponen de varios escalones de medida, cada uno de ellos configurados para operar en un determinado intervalo de tiempo (protección primaria o apoyo):

Zona 1

Comprende desde principio de línea hasta el 80% de ella. La razón de no llegar hasta el 100% de la línea es por motivos de selectividad y sobrealcance transitorio ante faltas muy cercanas al final de la línea que produzcan una operación incorrecta de la

protección. La actuación del relé ante faltas producidas en esta zona será obviamente de tiempo instantáneo t_1 como protección primaria de la forma más rápida posible.

Zona 2

Esta segunda zona está ajustada comprendiendo desde el 80% de la línea hasta el 50% de la línea contigua más corta. La operación de la protección ante faltas comprendidas en esta segunda zona será de tiempo diferido t_2 generalmente de 0,3 a 0,5 s como protección de apoyo a la espera de que la falta sea despejada por la protección primaria de la línea contigua en la que la falta tiene lugar. Si la falta tiene lugar en el 20 % final de la línea a proteger, está será despejada en Zona 1 por el relé situado en el extremo de la línea (si existe), y si además se dispone de un sistema de *Teleprotección*, se establecerá una comunicación entre ambos relés que obligará al primero a acelerar su operación de forma instantánea aun estando la falta en su Zona 2.

Zona 3

El ajuste de esta tercera zona debe cubrir sobradamente la línea contigua más larga, generalmente con una temporización t_3 de 1 a 1,5 s, consiguiéndose una protección de apoyo remoto de las líneas contiguas. Debe tomarse la precaución de que la impedancia de carga no entre dentro de esta zona. Ésto es muy difícil que ocurra con características de disparo *Mho* y *Elípticas*, pero no imposible con características *Poligonales*, especialmente en aquéllas en que no es posible variar la compensación de resistencia para cada escalón.

Zona 4

Los modernos relés de distancia disponen además de las tres zonas comentadas de una cuarta zona, que representa un área aguas arriba de la línea, o sea, hacia detrás del relé de distancia. Esto supone que los relés equipados con esta cuarta zona son capaces de detectar faltas que tengan lugar en una zona anterior a la línea a proteger. Los relés de distancia de los que disponemos en nuestra subestación disponen de esta cuarta zona, y además, será necesaria para conseguir nuestro sistema de protección de barras como más adelante veremos. Esta Zona 4 se ajustará según la topología de la instalación.

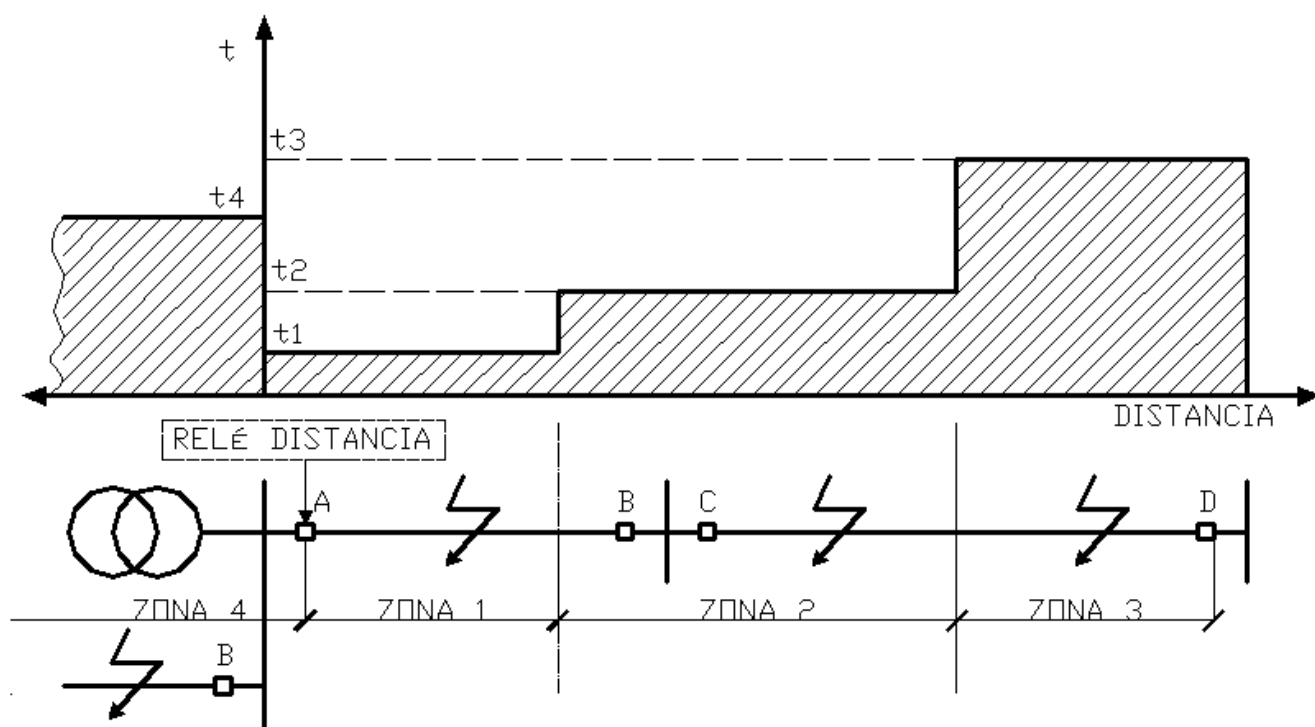


Figura 31. Zonas de operación protección de distancia.

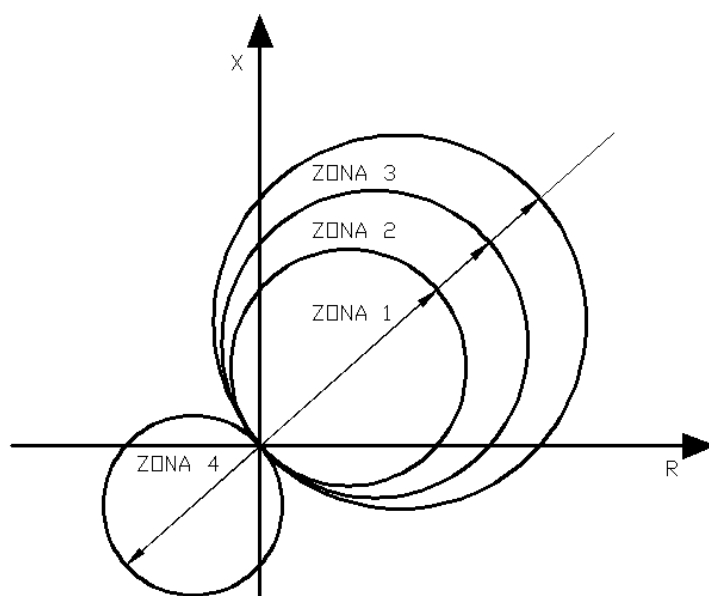


Figura 32. Característica y zonas de protección de distancia.

3. CONSECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN. FASES DE ESTUDIO Y DISEÑO.

Como todo proyecto de ingeniería, determinar la solución final para un determinado sistema que cumpla con las especificaciones marcadas conlleva un proceso de estudio y diseño en ocasiones arduo y lento. En nuestro caso, la solución adoptada es el resultado de una serie de análisis y diseños previos, que han sido desestimados por las condiciones de funcionamiento encontradas a lo largo del proceso que desembocaban en el incumplimiento de los requerimientos. Estos obstáculos intermedios han surgido principalmente por el hecho de tener que adaptarnos a una arquitectura, unas características y un equipamiento ya existente en la subestación.

Las fases de estudio y diseño de nuestro proyecto han sido las siguientes:

- *Primera fase. Alcance del proyecto.*
- *Segunda fase. Estudio de la topología y características de la subestación.*
- *Tercera fase. Estudio de los equipos de protección existentes.*
- *Cuarta fase. 1^{er} Diseño de protección (Desestimado).*
- *Quinta fase. 2^o Diseño de protección (Desestimado).*
- *Sexta fase. 3^{er} Diseño de protección (Aprobado). Solución adoptada.*

Vamos a realizar un pequeño análisis cronológico de las fases de estudio y diseño que acontecieron hasta llegar a nuestra solución final.

3.1 PRIMERA FASE. ALCANCE DEL PROYECTO.

El primer paso que dimos al iniciar este proyecto fue plantear y determinar nuestros objetivos, como ya se apuntó en la introducción de este documento, el alcance de nuestro proyecto era el diseño de una protección de barras colectoras de 45 kV para la subestación blindada de distribución de “Cerro de la Plata” en Madrid, propiedad de la compañía eléctrica *Unión Fenosa Distribución*.

La principal especificación de este proyecto, aparte de cumplir con las exigencias básicas de los sistemas de protección, era de tipo económico. Necesitábamos encontrar un diseño que cumpliera su función de manera eficiente, de desarrollo e implementación no muy compleja, sin necesidad de obtener unas altas y sofisticadas prestaciones, pero fundamentalmente y clave principal, que fuese atractiva económicamente, lo que coloquialmente se conoce como “Bueno, bonito y barato”.

Esta premisa nos llevó automáticamente a la conclusión de que nuestra solución pasaba por no instalar un relé de protección de barras, que aun siendo el elemento principal en el diseño de sistemas de protecciones, su elevado coste para nuestro nivel de tensión nos lo imposibilitaba, como veremos reflejado en la comparativa económica de la solución adoptada frente a la solución tradicional, aparte cuarto del presente proyecto.

Este hecho nos condujo directamente a lo siguiente, si no podemos instalar un relé de protección de barras, necesitamos diseñar un automatismo, que a través de las señales lógicas de los equipos de la subestación ya instalados a los que teníamos acceso, consigamos detectar una falta en las barras de 45 kV, despejarla de forma eficiente y señalizarla tanto de forma local en la subestación como de forma remota hacia el Centro de Control. En el caso de no poder realizar de forma satisfactoria la protección de barras con los equipos disponibles, debemos seleccionar y configurar aquellos que nos ayuden a realizarla, siempre y cuando el coste total de la inversión no supere el coste de la solución tradicional con relé diferencial de barras.

Una vez constatados nuestros objetivos, nuestro siguiente paso era comenzar con el estudio y análisis de la instalación y el equipamiento existente.

3.2 SEGUNDA FASE. ESTUDIO DE LA TOPOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DE LA SUBESTACIÓN.

Las características constructivas de la subestación, así como la topología y explotación de la misma, marcaron de forma inevitable el diseño de la solución adoptada, y sus prestaciones.

La subestación eléctrica de “Cerro de la Plata” está situada en C/ Ombú s/n de Madrid (zona Méndez Álvaro). Es una subestación de reparto y distribución, que posee tres niveles de tensión; 220, 45 y 15 kV. Está diseñada según la tecnología blindada *GIS* en todas sus posiciones y suministra energía eléctrica a más de 250.000 usuarios.

En la fotografía de la figura 33 podemos observar la disposición física real del nivel de tensión de 45 kV, con las posiciones de barras, línea, transformador y acoplamiento. Vemos como la aparamenta está encapsulada en SF₆, por medio de una envolvente metálica, y como en la parte inferior están dispuestos los cuadros de control y de protección de cada una de las posiciones.



El esquema de planta de la disposición física y el diagrama unifilar de la subestación son los siguientes:

Esquema disposición física de planta de subestación

APARAMENTA DE CORTE NIVEL 45 kV.

Como podemos apreciar en el diagrama unifilar de la subestación, en la posición de *Barras de 45 kV*, zona a proteger por nuestro sistema de protección, está compuesta por un total de:

- 14 posiciones de Línea.
- 2 posiciones de Transformador.
- 1 posición de Acoplamiento de barras.

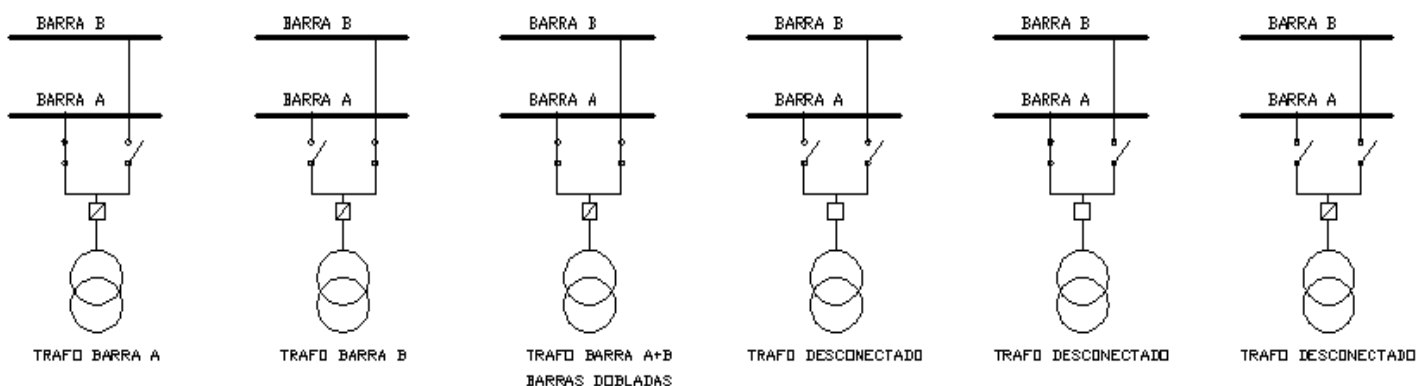
Todas las posiciones se componen de la siguiente aparamenta de corte:

Posición	Cantidad	Aparamenta	Tipo	I nominal	Fabricante	Mando Motorizado
Línea	1	Interruptor	WIB 8/52 25kA AREVA	1.250 A	Areva	Si
	2	Seccionador	WI-52 AREVA	1.250 A	Areva	Si
Trafo	1	Interruptor	WIB 8/52 25kA AREVA	2.000 A	Areva	Si
	2	Seccionador	WI-52 AREVA	2.000 A	Areva	Si
Acopl.	1	Interruptor	WIB 8/52 25kA AREVA	2.500 A	Areva	Si
	2	Seccionador	WI-52 AREVA	2.500 A	Areva	Si

Tabla 2. Aparamenta de corte 45kV.

TOPOLOGÍA Y EXPLOTACIÓN NIVEL 45 kV.

La topología estructural de este nivel de tensión es una configuración de “Doble Barra” con interruptor simple, y el modo de explotación más común es en barras independientes (interruptor de Acoplamiento abierto), cada una de ellas alimentada por un transformador y con sus líneas de alimentación correspondientes. Sin embargo, este modo de explotación podía verse modificado en cualquier momento, pudiendo tener una gran diversidad de configuraciones distintas, como podemos apreciar en los siguientes esquemas:



- ☒ INTERRUPTOR CERRADO
☐ INTERRUPTOR ABIERTO

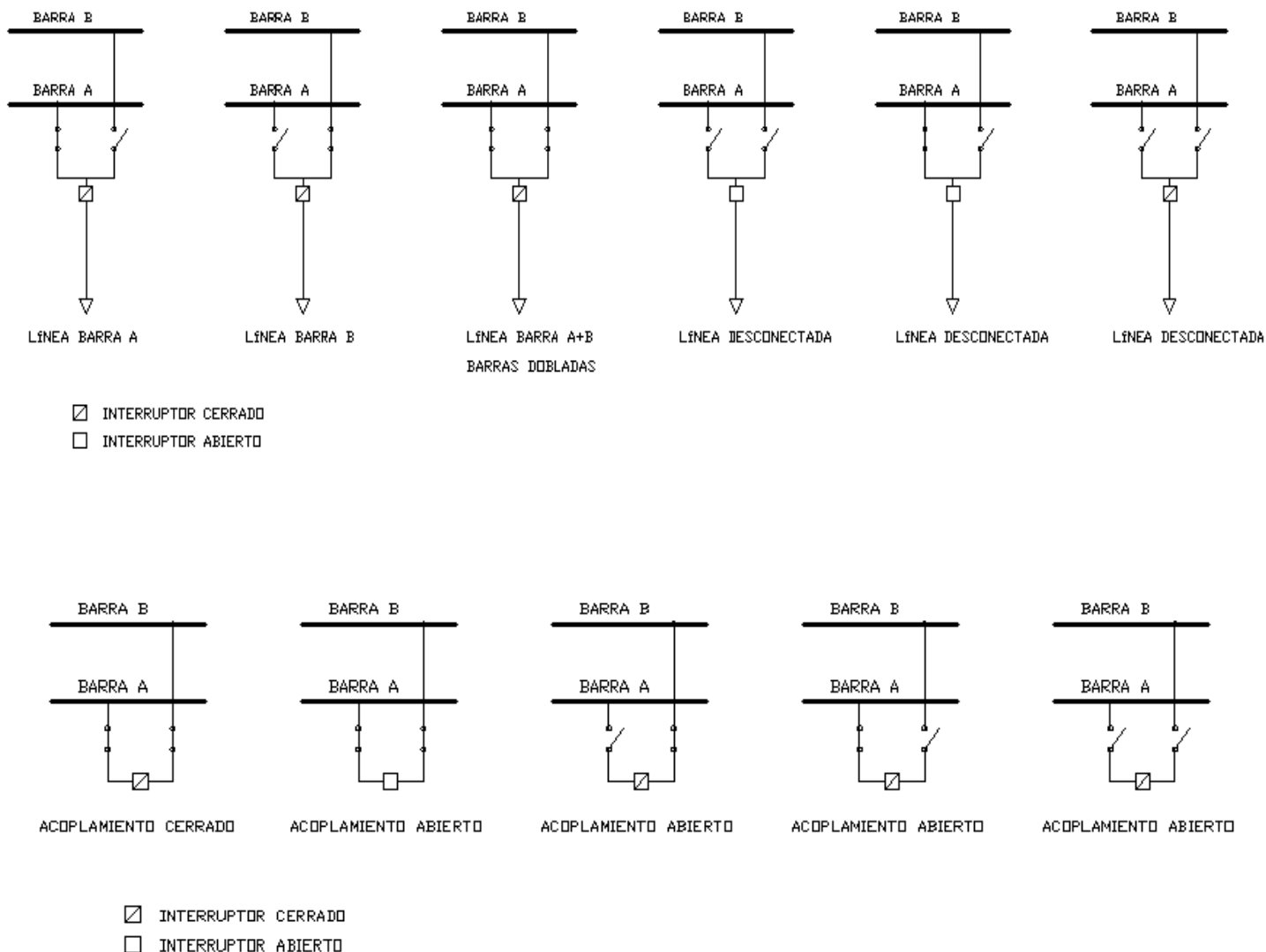


Figura 33. Esquemas topológicos de las posiciones de 45 kV.

En este punto, a la vista de la figura 33, nos encontramos con la primera dificultad y clave principal del diseño de nuestra solución:

“La configuración de la instalación en cuanto a su forma de explotación no es única, por lo que hay que tener en cuenta todas las posibilidades que se pueden dar en servicio y obtener un diseño capaz de adaptarse a todas ellas.”

3.3 TERCERA FASE. ESTUDIO DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN EXISTENTES.

Esta fase del proyecto está íntimamente relacionada con la anterior. Se han dispuesto de forma separada por seguir un criterio cronológico, ya que en un principio no teníamos la lista definitiva de equipos de protección existentes en nuestro nivel de tensión.

EQUIPAMIENTO DE PROTECCIONES NIVEL 45 Kv.

Los equipos de protección dispuestos en las distintas posiciones son:

Posición	Cantidad	Tipo	Modelo	Función	Fabricante
Línea	1	Principal	MICOM P441	Distancia	Areva
	1	Respaldo	8IRD-F1N	Sobreintensidad	ZIV
Trafo	1	Principal	MICOM P441	Distancia	Areva
Acopl.	1	Principal	8IRD-M1N	Sobreintensidad	ZIV

Tabla 3. Lista de equipos de protección.

Características destacables:

Relés de protección de Sobreintensidad.

- Detecta corrientes de cortocircuito equilibradas y desequilibradas.
- Detecta la corriente de cortocircuito en el sentido programado. (unidad direccional).

Relés de protección de Distancia.

- Detecta corrientes de cortocircuitos equilibradas y desequilibradas.
- Detecta sentido de la falta; aguas abajo (Zonas 1/2/3) y aguas arriba (Zonas 4/5).
- Detecta distancia a la falta.

Esta fase del estudio fue fundamental y marcó profundamente la forma en la que se diseñó nuestro automatismo. Aquí quedan enumeradas todas las distintas funciones de protección disponibles que nos permitieron saber qué señales, y de qué tipo, podíamos utilizar para nuestro esquema lógico a priori. Como ya se indicó anteriormente, el número total de funciones y señales podía verse incrementado en caso de instalar un mayor número de equipos o modificar los existentes para conseguir nuestro cometido.

Un primer análisis previo nos hizo pensar en la utilización de las unidades direccionales de las protecciones de sobreintensidad de líneas y transformadores para conseguir detectar una falta en barras. Esta primera idea, consistía en lo siguiente:

“Podemos conseguir nuestra protección de barras teniendo en cuenta que si las unidades de sobreintensidad direccional de posición de línea señalan que el sentido de la corriente por la línea que alimenta la falta es entrante hacia las barras, y las unidades de sobreintensidad direccional de posición de transformador indican que el sentido de la corriente de falta por el transformador es también entrante hacia las barras, entonces podemos afirmar que la falta está en las mismas y debe actuar nuestra protección.”

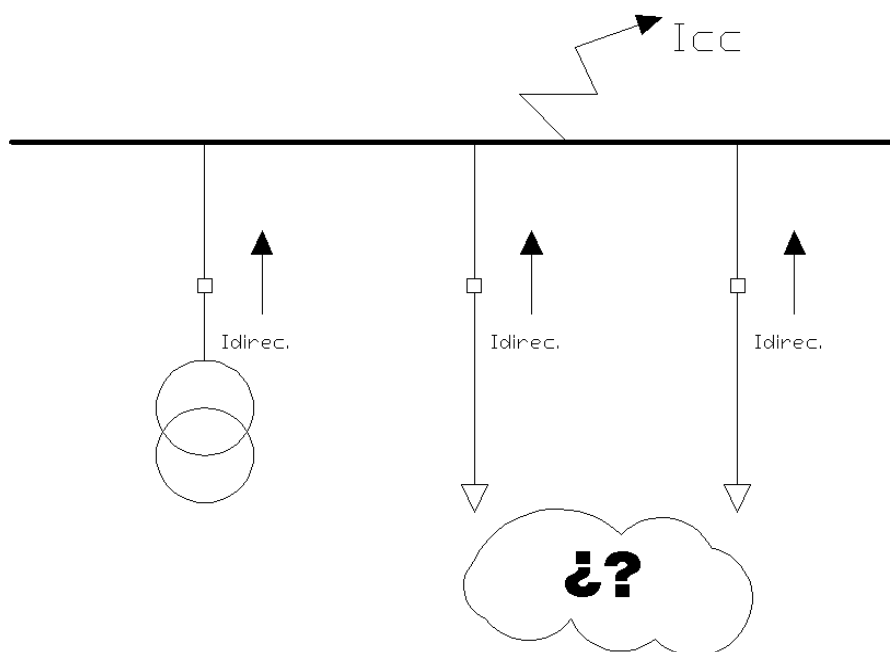


Figura 34. Comportamiento de unidades direccionales de sobreintensidad.

Este planteamiento quedó rápidamente descartado por el hecho de que existía la posibilidad de que aún habiendo una falta en barras, ésta no fuese detectada correctamente por las unidades de sobreintensidad direccional de las líneas. Al desconocer completamente la naturaleza de lo que tenían conectadas estas líneas en sus extremos remotos, no podíamos saber la magnitud de la corriente de retorno (si la hubiese) en caso de falta, por lo que no podíamos ajustar el umbral de operación de estas unidades.

Por otro lado, disponíamos de relés de protección de distancia en las posiciones de línea y transformador, que además de ser más fiables que las protecciones de sobreintensidad, al no afectarles la resistencia de falta (especificación de Areva), ni la magnitud de la corriente de cortocircuito, eran también más selectivos y por lo tanto más adecuadas para nuestro fin. Así que llegados a este punto se tomó la decisión de que nuestro diseño debía girar entorno a estos equipos.

3.4 CUARTA FASE. 1^{ER} DISEÑO DE PROTECCIÓN (DESESTIMADO).

Del análisis previo, como hemos señalado, concluimos que las señales con las que debíamos trabajar a priori eran las señales de actuación/señalización de los relés de protección de distancia. Recordemos que los relés de distancia poseen diferentes niveles (escalones) de operación, denominados zonas:

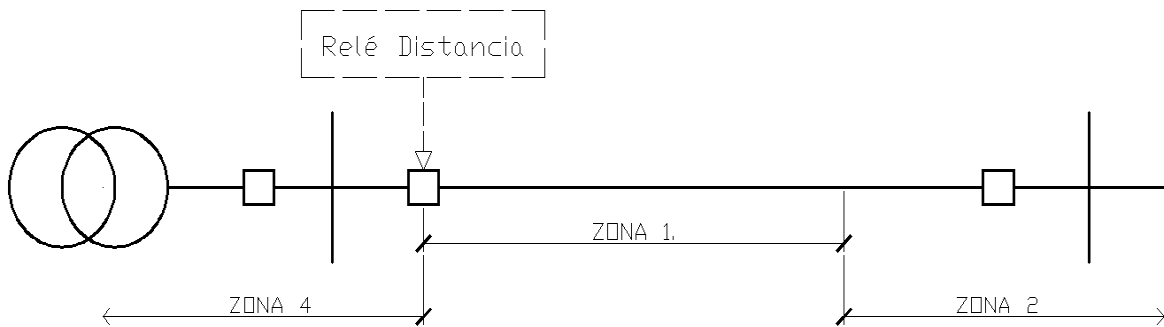


Figura 35. Zonas de operación de protección de distancia.

La base de nuestra idea consistía en lo siguiente:

“Una falta en una barra determinada, quedaba constatada por la señalización de la falta en Zona 4 (hacia atrás) por parte de los relés de distancia de las posiciones de línea que estuviesen acopladas a la barra en falta, y por la señalización de la falta en Zona 1 (hacia adelante) por parte de los relés de distancia de las posiciones de transformador que estuviesen acoplados a dicha barra en falta.”

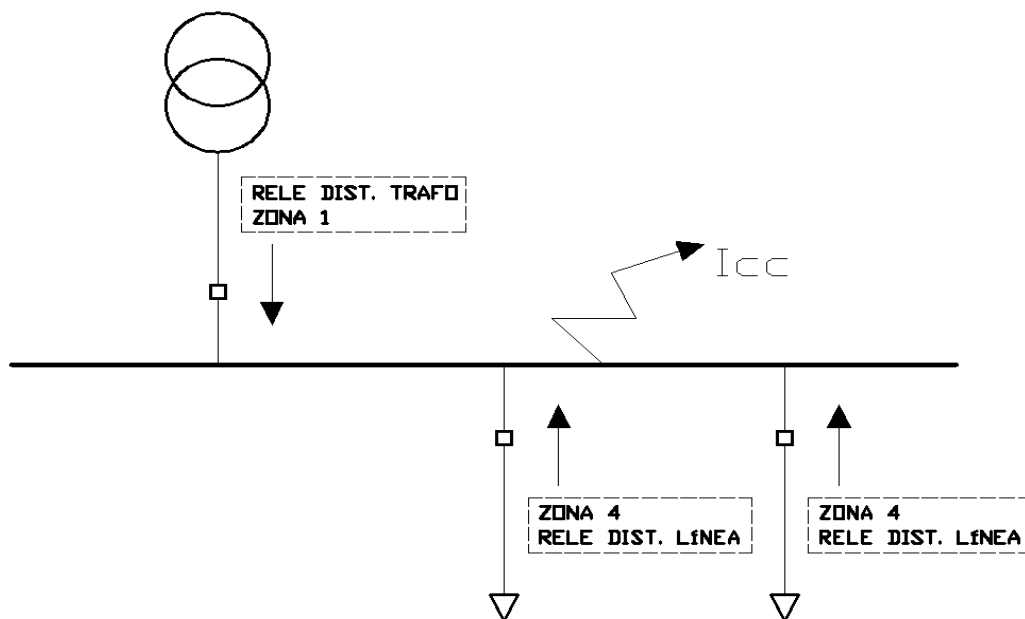
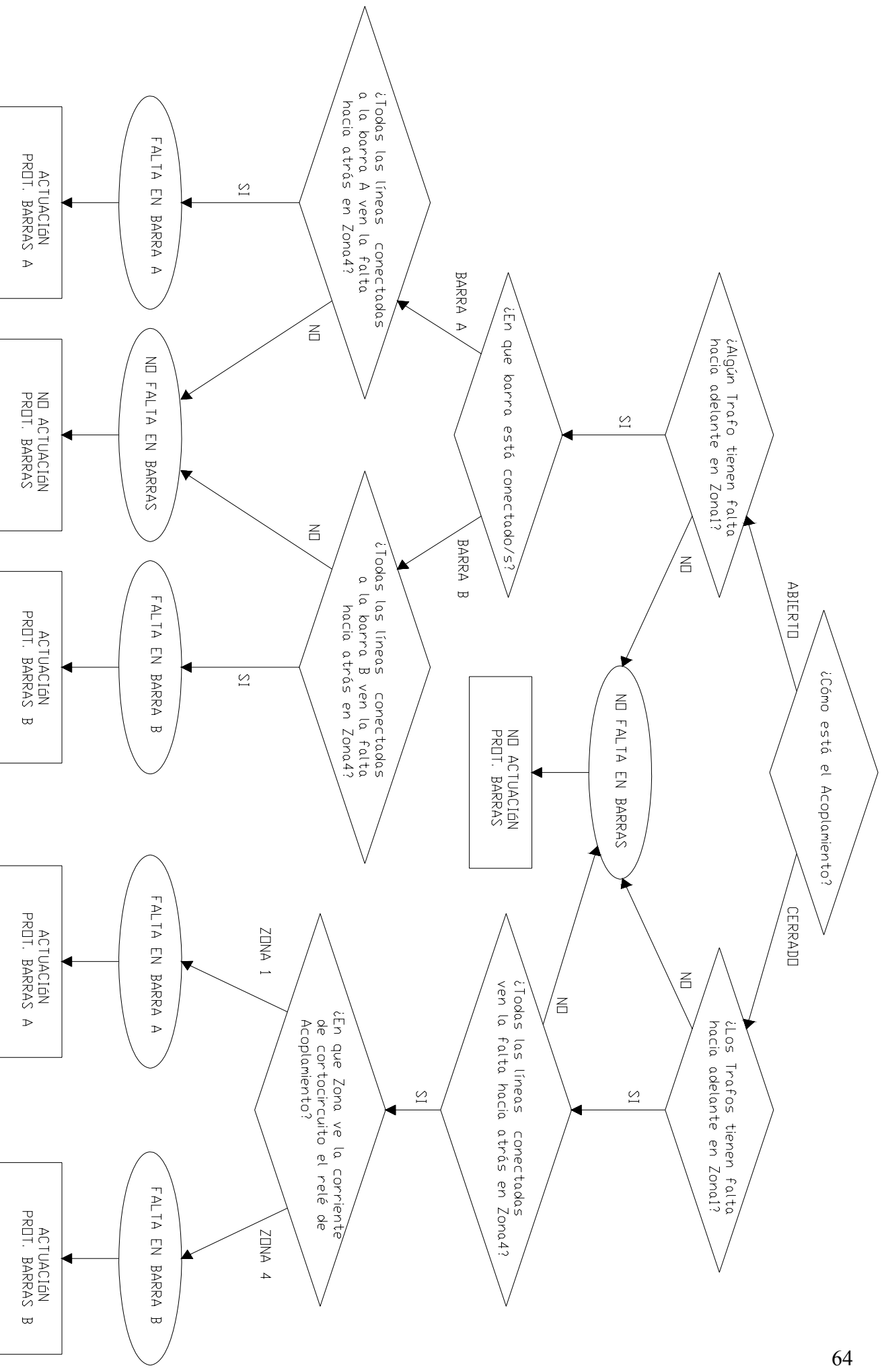


Figura 36. Comportamiento de los relés de distancia ante falta en barras.

La idea se basaba en el siguiente algoritmo:

SISTEMA DE PROTECCIÓN DE BARRAS



Una vez determinado el algoritmo lógico que se iba a utilizar, debíamos decidir de qué forma se ejecutaría. Estudiando el manual de los relés de distancia *MICOM P441 de Areva*, descubrimos que estos equipos permitían al usuario desarrollar una pequeña programación lógica de las salidas del relé a través de puertas lógicas “OR” “AND” y “ \geq ” (*mayor o igual que*), por lo que decidimos utilizar esta aplicación que nos brindaba los relés de distancia MICOM P441 de Areva para llevar a cabo nuestro sistema de protección.

En líneas generales, nuestra primera idea se basaba en introducir a los relés de protección instalados una serie de señales de entrada (posición de seccionadores e interruptores, señalización de falta de otras posiciones), que a través de una programación lógica implementada, activasen una serie de salidas de relé que nos indicasen la ocurrencia de una falta en una barra determinada. Se escogió para este cometido el relé de Acoplamiento.

Nota: *“Como se puede observar en el algoritmo y en la figura 38, hemos sustituido el relé de Acoplamiento existente de sobreintensidad, por un relé de distancia, ésto es debido a que los relés de sobreintensidad direccionales sólo ven falta en un sentido, como necesitamos detectar la falta en ambos sentidos decidimos realizar esta sustitución. Dicha sustitución se tendrá en cuenta en los posteriores diseños y en el análisis económico de la solución adoptada.”*

Un croquis simplificado de la arquitectura del sistema, y el esquema lógico de la programación interna que implementaríamos en los relés de Acoplamiento podemos verla en la siguiente figura:

CRDQUIS ARQUITECTURA PROT. BARRAS

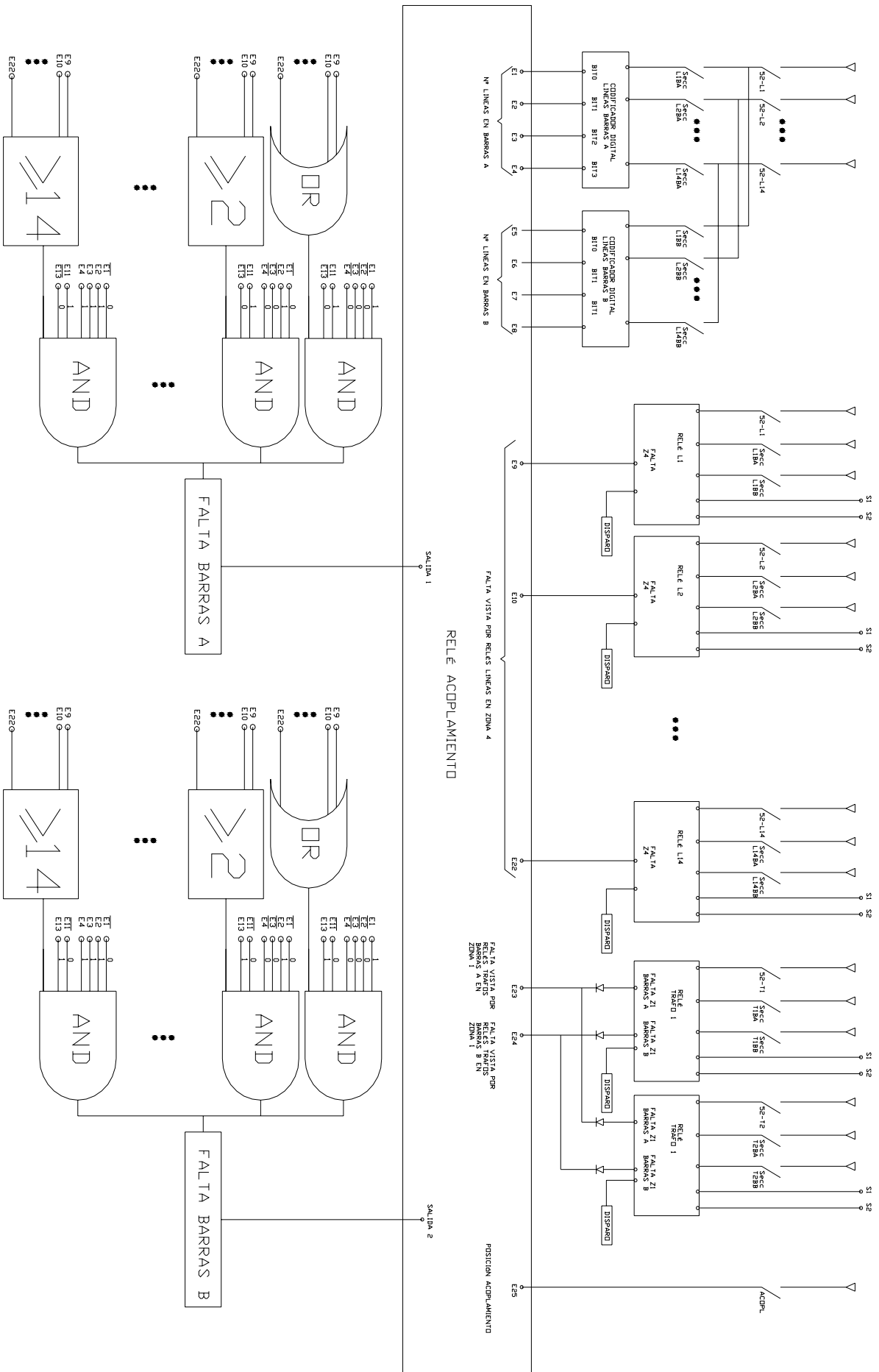


Figura 38. Arquitectura del 1er diseño.

LISTA DE DISPOSITIVOS Y SEÑALES

<u>ELEMENTO</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
Codificador dig. Barras A	Convierte en forma binaria el número de líneas conectadas a la barra B.
Codificador dig. Barras B	Convierte en forma binaria el número de líneas conectadas a la barra A.
<u>Contacto auxiliares</u>	
52-L "X"	Estado del interruptor de la línea "X".
Secc-L "X"BA	Estado del seccionador de Barras A de la línea "X".
Secc-L "X"BB	Estado del seccionador de Barras B de la línea "X".
Acopl	Estado del Acoplamiento.
<u>Entradas digitales relé</u>	
E1	Bit 0 Codificador dig. Barras A.
E2	Bit 1 Codificador dig. Barras A.
E3	Bit 2 Codificador dig. Barras A.
E4	Bit 3 Codificador dig. Barras A.
E5	Bit 0 Codificador dig. Barras B.
E6	Bit 1 Codificador dig. Barras B.
E7	Bit 2 Codificador dig. Barras B.
E8	Bit 3 Codificador dig. Barras B.
E9	Estado de la Zona 4 línea 1.
E10	Estado de la Zona 4 línea 2.
E11	Estado de la Zona 4 línea 3.
E12	Estado de la Zona 4 línea 4.
E13	Estado de la Zona 4 línea 5.
E14	Estado de la Zona 4 línea 6.
E15	Estado de la Zona 4 línea 7.
E16	Estado de la Zona 4 línea 8.
E17	Estado de la Zona 4 línea 9.
E18	Estado de la Zona 4 línea 10.
E19	Estado de la Zona 4 línea 11.
E20	Estado de la Zona 4 línea 12.
E21	Estado de la Zona 4 línea 13.
E22	Estado de la Zona 4 línea 14.
E23	Estado de la Zona 1 Trafo 1 ó 2 en Barras A.
E24	Estado de la Zona 1 Trafo 1 ó 2 en Barras B.
E25	Estado del Acoplamiento.
<u>Salidas digitales relé</u>	
SALIDA 1	Falta en Barras A.
SALIDA 2	Falta en Barras B.

Tabla 4. Lista de dispositivos y señales.

El funcionamiento de este sistema consistía en lo siguiente:

“El codificador digital de Barras A indica de forma binaria el número total de líneas conectadas a la Barra A a través de las entradas E1 hasta E4, el codificador digital de Barras B indica de forma binaria el número total de líneas conectadas a la Barra B a través de las entradas E5 hasta E8. Las entradas E9 hasta E22 indican que líneas señalizan una falta en Zona 4 y las entradas E23 y E24 nos señalan una falta en Zona 1 por parte de los transformadores en Barras A y Barras B respectivamente. Finalmente la entrada E25 nos indica si el Acoplamiento está cerrado o abierto.

Una falta en una determinada barra queda constatada por la señalización de falta en Zona 1 por parte del Trafo o Trafos acoplados a dicha barra y por la indicación de Zona 4 por parte de los relés de línea. Si el número de líneas que indican la falta en Zona 4 coinciden con el número total de líneas conectadas a la barra en falta a través del Codificador digital de Barras A/B, significa la ocurrencia de una falta en barras y la actuación de la salida correspondiente (SALIDA 1 para faltas en Barras A y SALIDA 2 para faltas en Barras B).

La maniobra de despeje de la falta se realiza introduciendo las señales de falta (SALIDA 1 Y SALIDA 2) como entradas en los relés de las distintas posiciones. Si una de estas entradas era activada, los relés de las posiciones que se encontrasen conectadas a la barra señalada por la entrada dada, activarían la salida correspondiente al disparo del interruptor de dicha posición.”

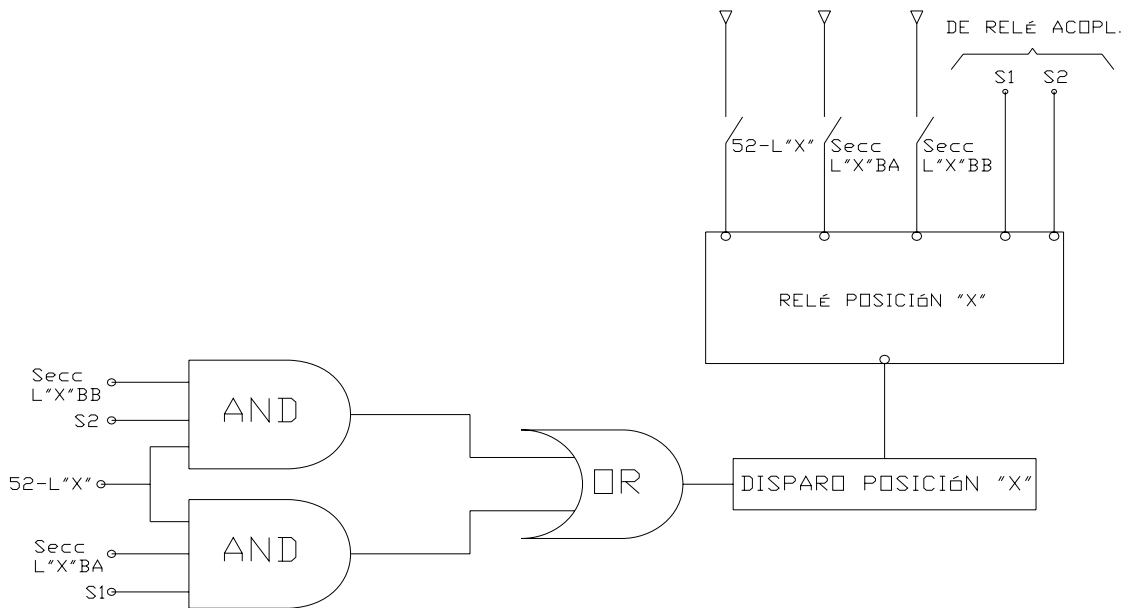


Figura 39. Maniobra de disparo de interruptor.

A priori, nuestro sistema daba la sensación de que podía ser viable, solamente necesitábamos estudiar los esquemas eléctricos de cableado de los módulos de entrada y salida de los relés de las distintas posiciones, y obtener la relación de entradas y salidas libres con las que podíamos trabajar.

Pero antes de proceder al estudio de los esquemas de cableado, y tras una breve reunión con el tutor surgió el problema responsable de la desestimación de este sistema:

“El codificador digital, al ser un dispositivo electrónico diseñado por nosotros de uso exclusivo para esta aplicación, no disponía de un montaje normalizado, ni tampoco de referencias en experiencias de anteriores proyectos, ni había sido ensayado y aceptado por fabricantes eléctricos según normativa electrotécnica.”

Por lo tanto, no se podía garantizar las mínimas exigencias de fiabilidad y seguridad de funcionamiento de este elemento. Unión Fenosa no permitía la instalación de este codificador digital, ni la implementación de este sistema, por lo tanto, nuestro diseño fue definitivamente desestimado.

3.5 QUINTA FASE. 2º DISEÑO DE PROTECCIÓN (DESESTIMADO).

Esta fase del proyecto comenzó con una revisión en profundidad de las decisiones tomadas hasta el momento, había que hacer balance de la situación en la que estábamos, y analizar qué factores podíamos disponer para nuestro desarrollo futuro, y qué factores debíamos desechar.

Llegados a este punto, sabiendo que no podíamos contar con los relés de distancia para desarrollar el esquema lógico de nuestro sistema, teníamos que barajar otras posibilidades:

- *Lógica programable con PLC (Autómata). (Desestimada).*
- *Lógica cableada con relés auxiliares. (Aceptada).*

Si recordamos cuál es la especificación principal de nuestro diseño: *“Buscamos una protección de barras que sea atractiva económicamente”*, debíamos intentar evitar en la medida de lo posible instalar en nuestro sistema un equipo PLC. Aunque este clase de dispositivos disponen de una potencia de programación lógica muy elevada, y unas características de cableado, montaje y puesta en marcha muy ventajosas que hacen que su papel en los esquemas de automatización hoy en día sea determinante, el coste del equipo y módulos auxiliares, licencias software así como el coste de la ingeniería de control para programarlo e implementarlo, encarecía enormemente el coste de la inversión, y se desaconsejaba su instalación. Además, debíamos tener en cuenta como se comentó en el diseño anterior que debíamos sustituir el relé de Acoplamiento para conseguir nuestro sistema, lo que incrementaba todavía más nuestro coste total.

Acabamos de llegar a un punto de inflexión de nuestro estudio, a razón de todo lo expuesto anteriormente, determinamos que nuestro sistema debía consistir en el diseño de un automatismo de lógica cableada por medio de relés auxiliares (monoestables y biestables), que aun siendo una implementación que no goza con las capacidades y prestaciones de los sistemas basados en relés electrónicos de protección diferenciales de barras ni de un sistema basado en lógica programable, satisfacía correctamente las exigencias básicas.

Debemos recordar que estamos buscando una protección de barras de 45 kV (Media Tensión), las especificaciones de diseño en cuanto a rapidez, selectividad, fiabilidad y sensibilidad, así como otras características como pueden ser tratamiento de datos, aplicaciones informáticas de ajuste, configuración y control, que debemos cumplir, aun siendo muy importantes, nos son tan exigentes como en niveles de tensión superiores (Alta Tensión). Por lo tanto consideramos que un sistema por lógica cableada es una solución suficientemente efectiva.

El planteamiento lógico es igual que el anterior, ya que la naturaleza de las señales lógicas a utilizar son la misma (señales de relés de distancia, y contactos auxiliares de posición de interruptores y seccionadores). La diferencia entre ambos montajes es su forma de implementación. Recordemos en que consistía la idea general:

“Una falta en una barra determinada, quedaba constatada por la señalización de la falta en Zona 4 (hacia atrás) por parte de los relés de distancia de las posiciones de línea que estuviesen acopladas a la barra en falta, y por la señalización de la falta en Zona 1 (hacia adelante) por parte de los relés de distancia de las posiciones de transformador que estuviesen acoplados a dicha barra en falta.”

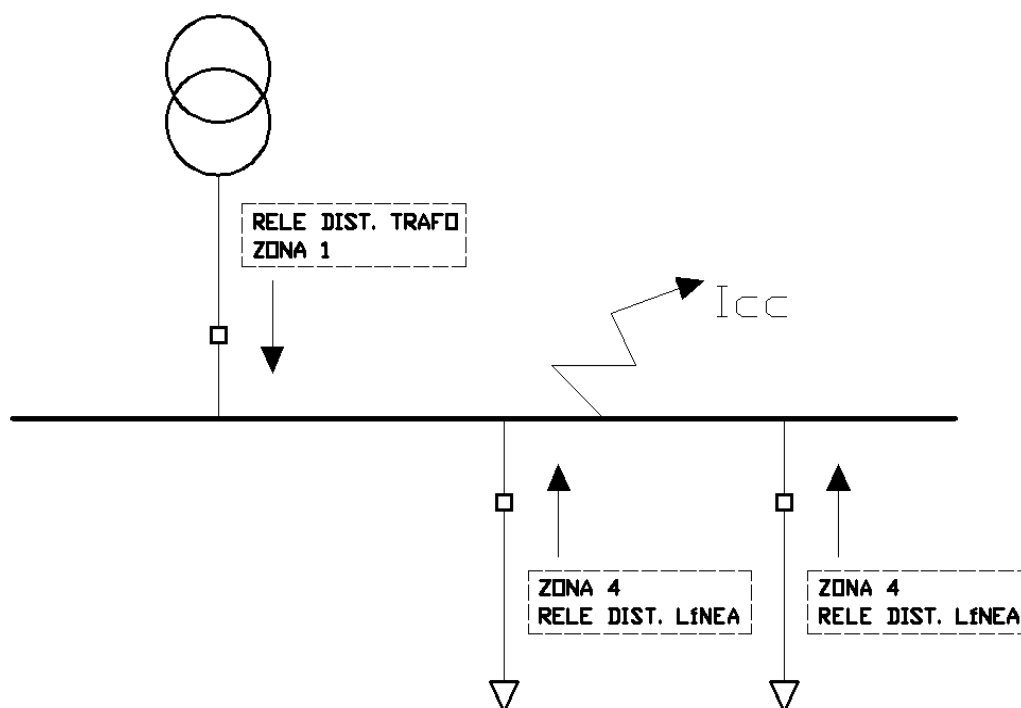
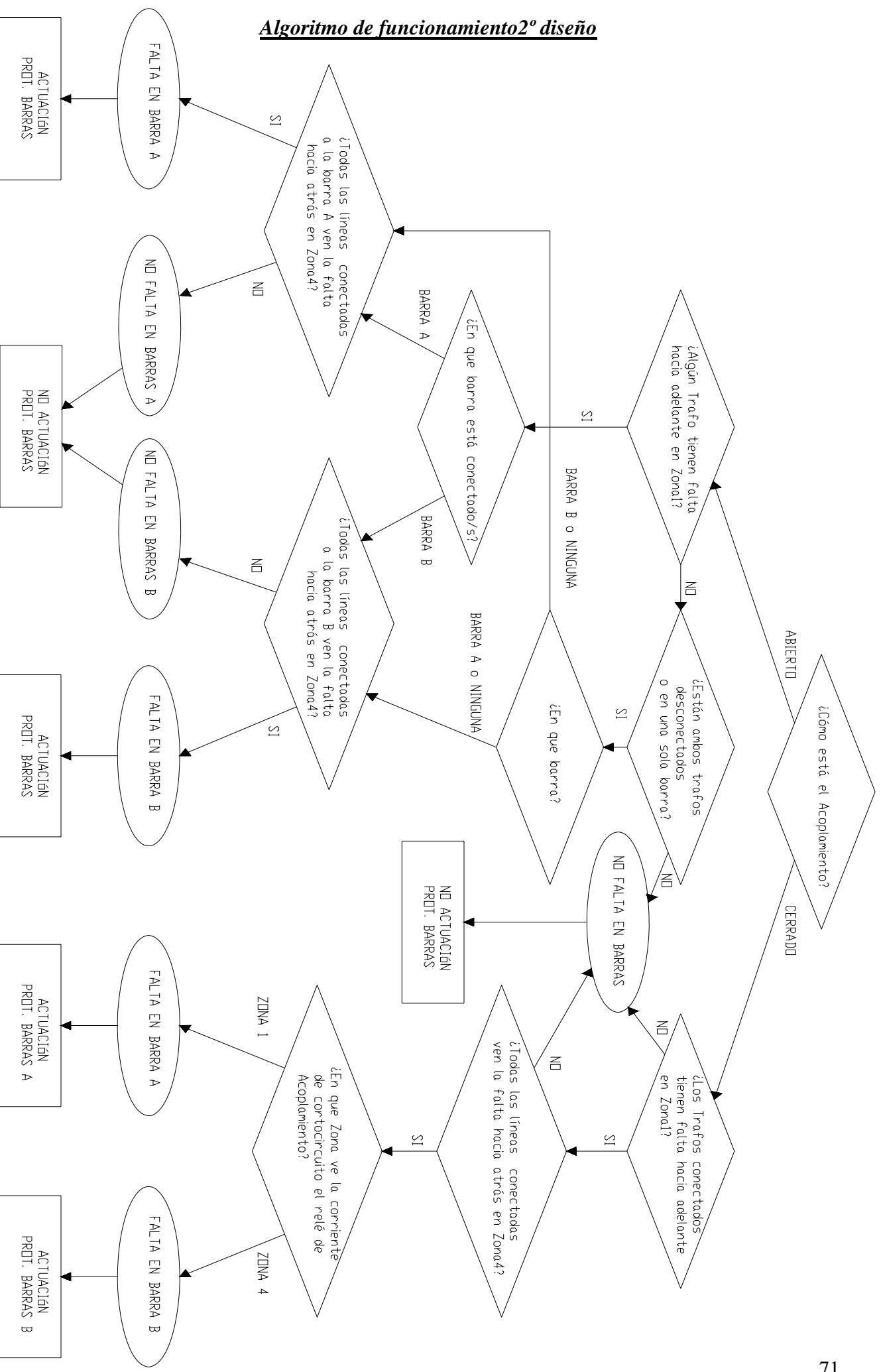


Figura 40. Comportamiento de los relés de distancia ante falta en barras.

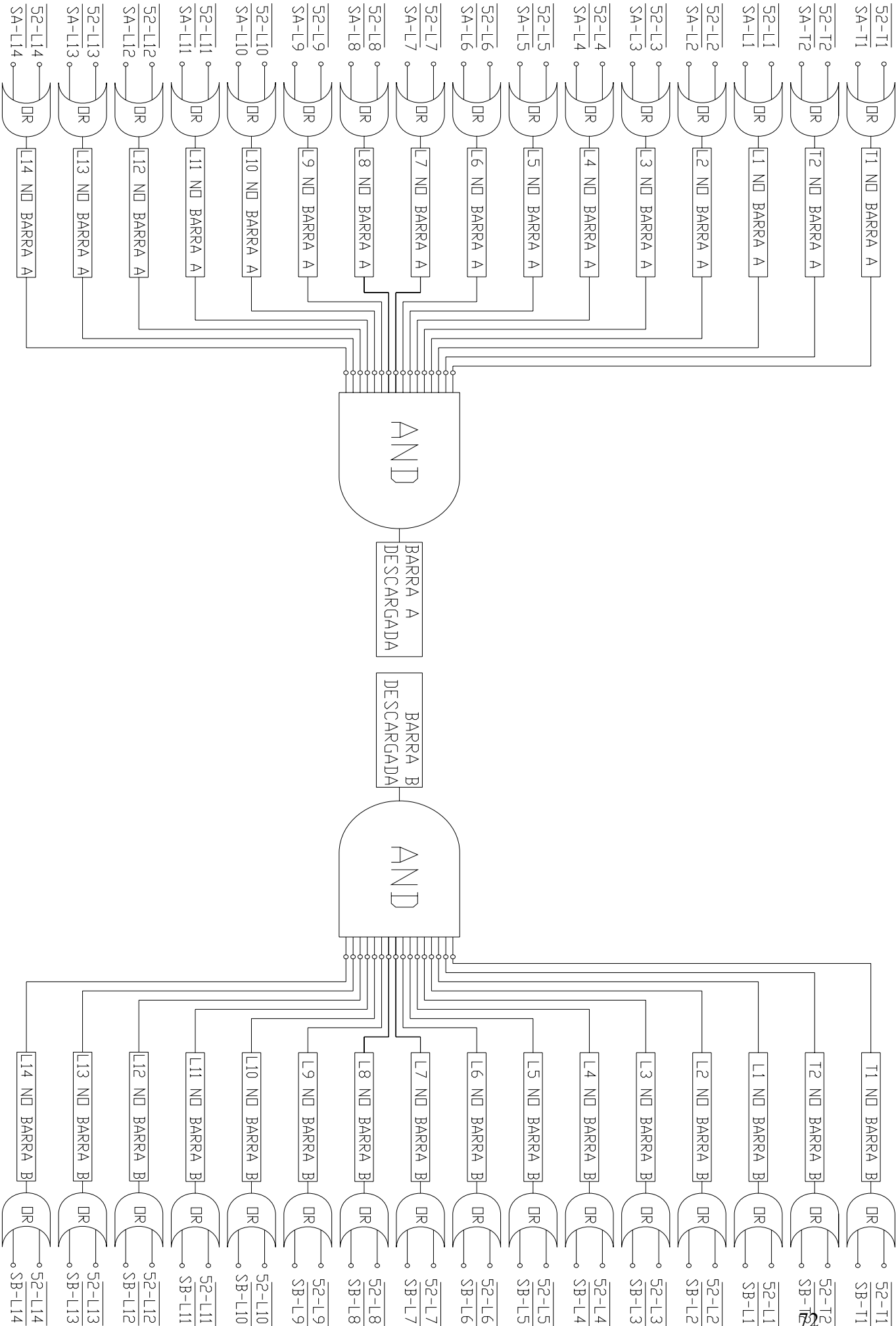
El diagrama de flujo del algoritmo utilizado es similar, por todo lo comentado anteriormente. La única diferencia radicaba en que en este diseño, habíamos tenido en cuenta la posibilidad de que la alimentación de las barras se podía realizar en ausencia de los transformadores de potencia, a través de una línea de alimentación conectada a una subestación remota, por lo que tuvimos que añadir una condición más a nuestro esquema lógico

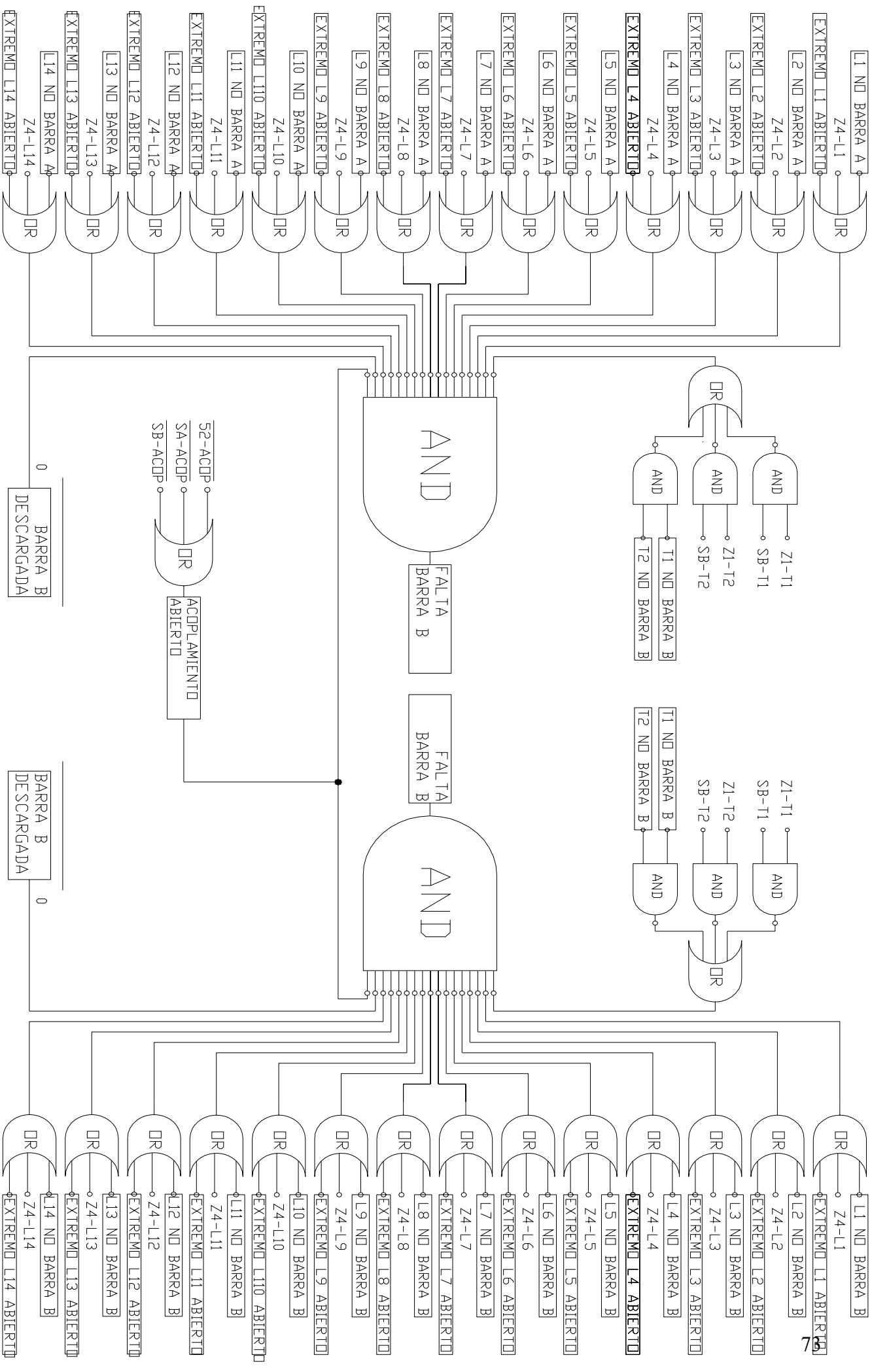
El algoritmo y el diagrama lógico implementado son los siguientes:

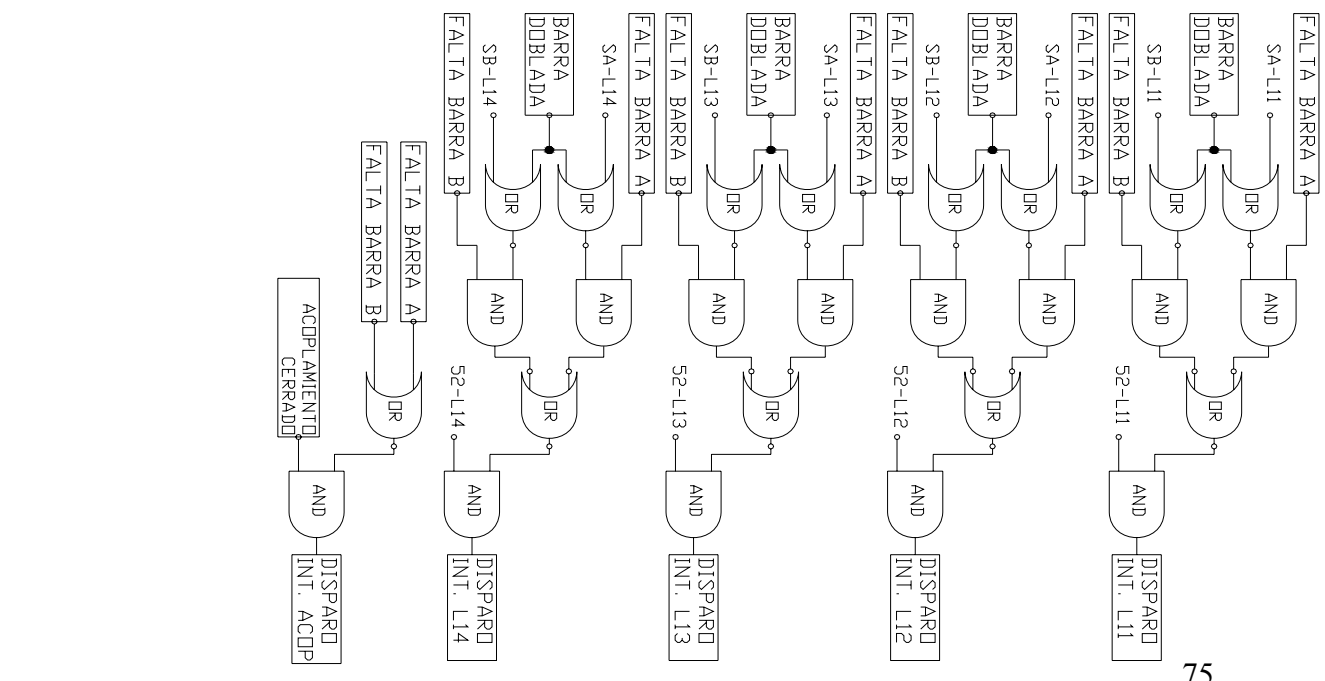
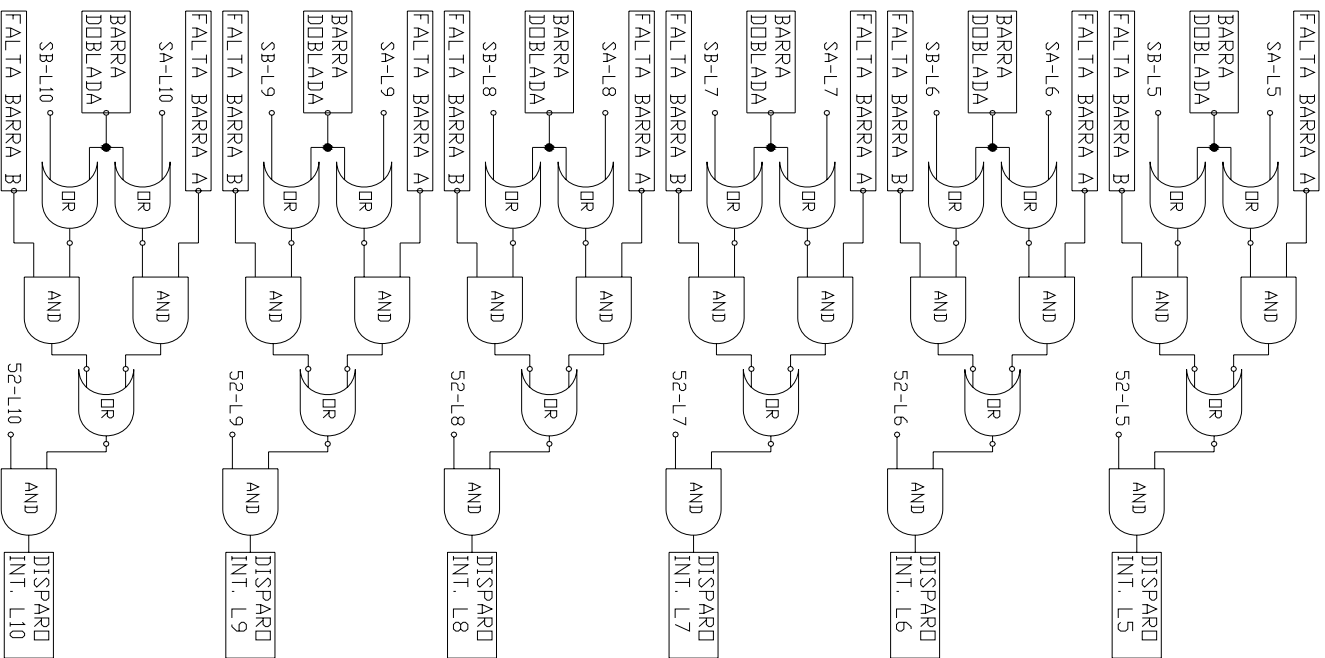
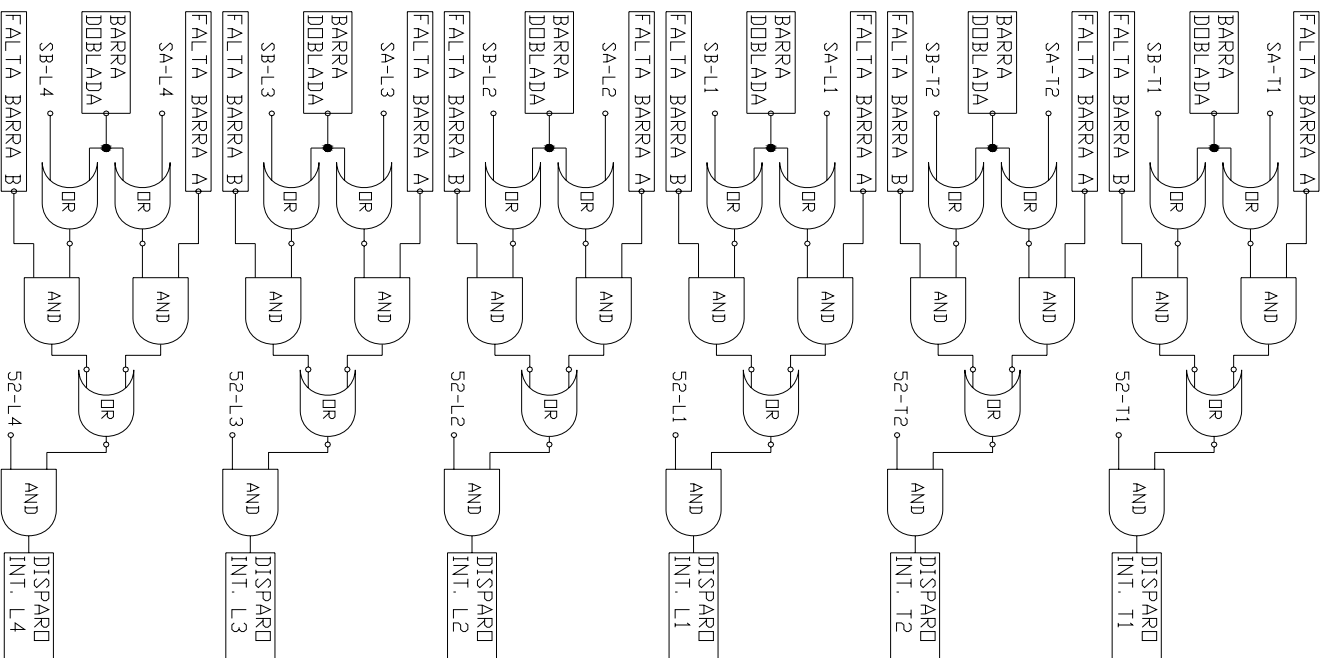
SISTEMA DE PROTECCIÓN DE BARRAS



Esquema lógico 2º diseño







LISTA DE SEÑALES

SEÑAL	DESCRIPCIÓN
SA-L "X"	Estado del seccionador de barras A de la línea "X".
SA-T "X"	Estado del seccionador de barras A del transformador "X".
SA-ACOP	Estado del seccionador de barras A del acoplamiento.
SB-L "X"	Estado del seccionador de barras B de la línea "X".
SB-T "X"	Estado del seccionador de barras B del transformador "X".
SB-ACOP	Estado del seccionador de barras B del acoplamiento.
52-L "X"	Estado del interruptor de la línea "X".
52-T "X"	Estado del interruptor del transformador "X".
52-ACOP	Estado del interruptor del acoplamiento.
Z1-L "X"	Estado de la Zona 1 relé distancia línea "X".
Z1-T "X"	Estado de la Zona 1 relé distancia transformador "X".
Z1-ACOP	Estado de la Zona 1 relé distancia acoplamiento.
Z4-L "X"	Estado de la Zona 4 relé distancia línea "X".
Z4-ACOP	Estado de la Zona 4 relé distancia acoplamiento.
L "X" NO BARRA A	Línea "X" no conectada a barras A.
L "X" NO BARRA B	Línea "X" no conectada a barras B.
T "X" NO BARRA A	Transformador "X" no conectado a barras A.
T "X" NO BARRA B	Transformador "X" no conectado a barras B.
BARRA A DESCARGADA	No hay ninguna posición conectada a barras A.
BARRA B DESCARGADA	No hay ninguna posición conectada a barras A.
EXTREMO L "X" ABIERTO	Interruptor del otro extremo de la línea está abierto.
BARRA DOBLADA	Alguna posición está conectada a barras A y B a la vez.
ACOPLAMIENTO ABIERTO	Acoplamiento abierto.
ACOPLAMIENTO CERRADO	Acoplamiento cerrado.
FALTA BARRA A	Existe falta en barras A.
FALTA BARRA B	Existe falta en barras B.
DISPARO INT.L "X"	Orden de disparo del interruptor de línea "X".
DISPARO INT.T "X"	Orden de disparo del interruptor de transformador "X".
DISPARO INT.ACOP	Orden de disparo del interruptor acoplamiento.

Tabla 5. Lista de señales 2º diseño.

Este sistema era inmune a los problemas del diseño anterior, todos los elementos que lo conformaban eran dispositivos existentes en el mercado, y cumplían los criterios y normativas de calidad de fabricación vigentes. Lamentablemente, nuestra lógica no estaba completa, faltaba un último detalle, no éramos capaces de detectar una posible condición en la explotación externa a la subestación, que en el caso de darse, bloqueaba completamente la operación de nuestro sistema de protección. Esta condición era el estado de apertura del interruptor en el extremo remoto de cualquiera de las posiciones de línea, y que bloqueaba la señalización de los relés de distancia en Zona 4 (hacia atrás) de las posiciones de línea que se encontrasen afectadas por esa condición como podemos ver en la siguiente figura:

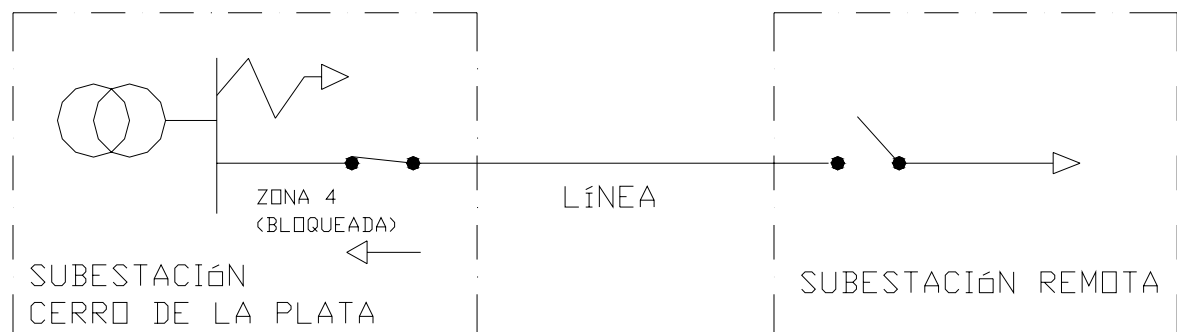


Figura 41. Ejemplo de extremo de línea abierto.

Este estado abierto del interruptor era indetectable para nosotros por lo siguiente:

- No existía ningún canal directo de comunicación con las subestaciones remotas, por lo que no teníamos acceso a las señales los contactos auxiliares de posición de dichos interruptores.
- No se podía determinar los valores de las magnitudes eléctricas (potencia reactiva, corriente, desfase) que ocasionaría esta condición de una forma totalmente exacta, por lo que no podíamos ajustar unos umbrales y niveles de operación en los relés los suficientemente fiables como para indicar la posición abierta del interruptor de una forma segura y eficiente.

Como podemos ver en el esquema lógico, existen una serie de estados llamados “*EXTREMO LÍNEA ‘X’ ABIERTO*”. Estos estados representan la condición lógica de “*interruptor remoto de línea abierto*” que nos bloqueaba la operación del sistema. Al no poder evaluar y señalizar esta condición, este sistema lamentablemente fue desestimado.

3.6 SEXTA FASE. 3^{ER} DISEÑO DE PROTECCIÓN (APROBADO). SOLUCIÓN ADOPTADA.

El último condicionante surgido con los interruptores remotos de extremo de línea al que no conseguimos darle solución alguna, significaba que teníamos que replantear completamente la estrategia que habíamos llevado hasta el momento. Había que retroceder y comenzar otra vez de nuevo. Enfrentarse a esta nueva fase significó un sobreesfuerzo, que finalmente mereció la pena.

Opiniones personales aparte, vamos a analizar esta última fase, que fue en la que dimos con la solución final de nuestro diseño. Como hemos comentado anteriormente, hubo que realizar un cambio estructural en nuestro diseño, la conclusión obtenida en la tercera fase de nuestro estudio de que la naturaleza de las señales que debíamos utilizar eran las de los relés de protección de distancia quedó en entredicho, y debíamos barajar otras posibilidades, en la que se encontraba la incorporación de nuevos equipos con nuevas funciones de protección que nos ayudasen a encontrar la solución. Las unidades direccionales de los relés de sobreintensidad tenían el mismo problema que los relés de distancia, si el interruptor del otro extremo de línea estaba abierto, éstas no podían detectar un sentido de corriente entrante en las barras, por lo que quedaban inutilizadas.

Finalmente encontramos una posible solución, que sacrificaba la alta rapidez de operación que se conseguía en los otros diseños, a favor de la selectividad, pero que podía operar bajo todas las posibles topologías y modos de explotación de nuestra subestación, y fue por tanto, nuestra solución adoptada.

Antes de exponer el esquema lógico, vamos a comenzar con un análisis simplificado de los diferentes tipos de faltas que pueden ocurrir en la red en función del modo de alimentación de las barras, y del comportamiento de nuestras protecciones de distancia frente a cada una de ellas, que nos van a ayudar a comprender más fácilmente la base de nuestra solución.

Existen dos formas diferentes de transmitir potencia hacia a las barras para la alimentación de las líneas de salida:

- *Alimentación de barras a través de Transformador.*
- *Alimentación de barras a través de línea auxiliar (No hay transformadores conectados).*

El primero de los casos el método normal de funcionamiento de toda subestación eléctrica. Sin embargo, puede ocurrir que mientras un transformador está fuera de servicio por mantenimiento, el transformador adyacente o sus dispositivos auxiliares fallen, o incluso ambos transformadores, por lo que si queremos mantener operativas y en servicio las líneas de 45 kV, debemos realizar la alimentación de las barras a través de una línea auxiliar proveniente de otra subestación cercana que nos de apoyo para este cometido, nos encontramos en el segundo de los casos.

Alimentación de barras a través de Transformador

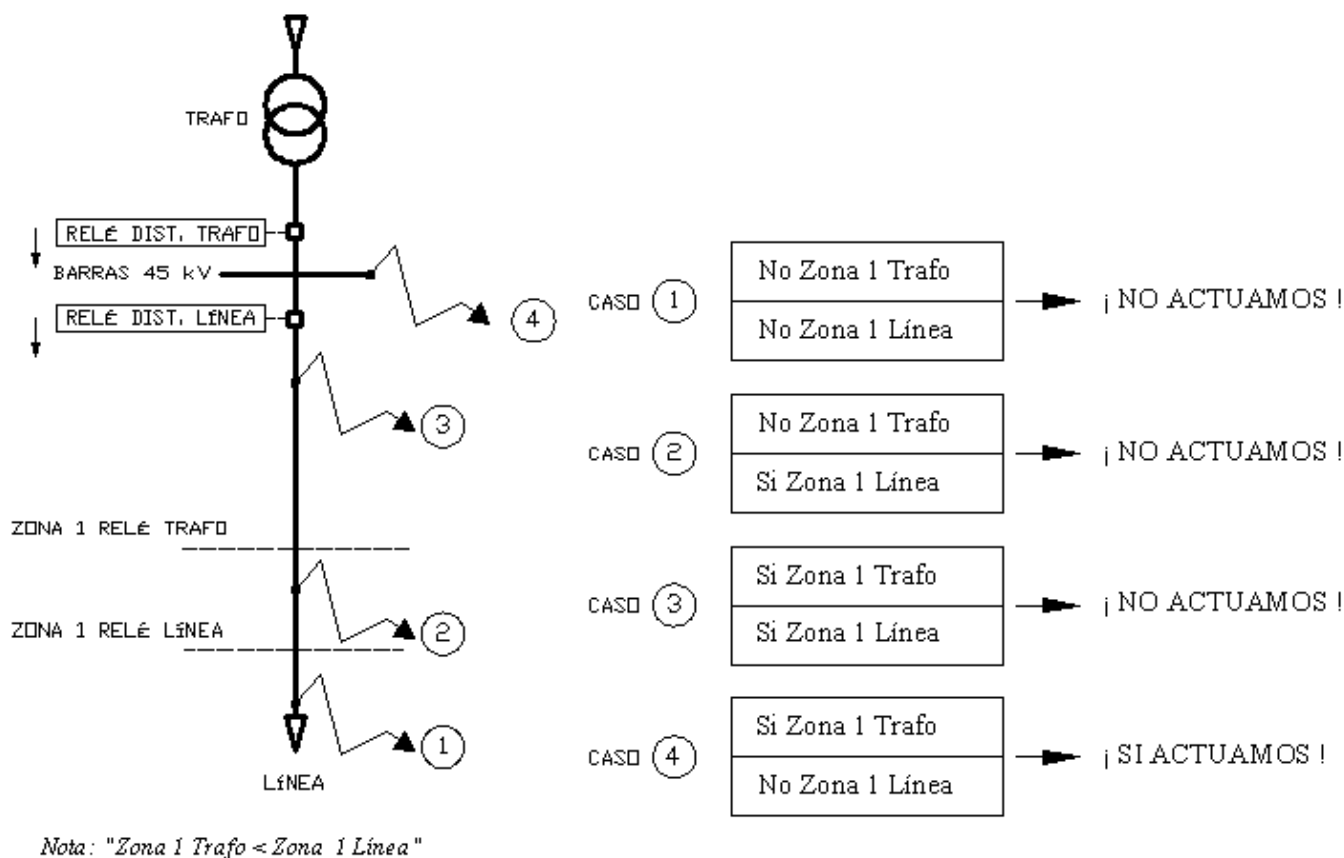


Figura 42. Alimentación de barras a través de transformador.

A la vista de las distintas posibilidades, observamos que nuestro sistema de protección operará en el *Caso 4*, y que se deben dar dos condiciones:

- **Zona 1** relé de distancia posición de transformador
- **NO Zona 1** relé de distancia posición de línea

Sin embargo, a la hora de implementar eléctricamente el sistema adoptado debemos tener en cuenta lo siguiente:

“Al basarse la actuación del sistema en la condición de reposo de un relé de protección (NO Zona 1 relé línea), hay que asegurarse completamente de que esta condición se cumpla realmente, y no produzca disparos intempestivos por un funcionamiento incorrecto. Necesitamos introducir un pequeño retardo en la señalización de Zona 1 del relé de transformador para asegurarnos de que la falta no está en la línea y conseguir una operación selectiva y correcta.”

Esta señalización retardada se consigue de forma interna programándola mediante el software de configuración de los relés de protección de Areva *MICOM S1*.

Alimentación de barras a través de línea auxiliar (No hay transformadores conectados)

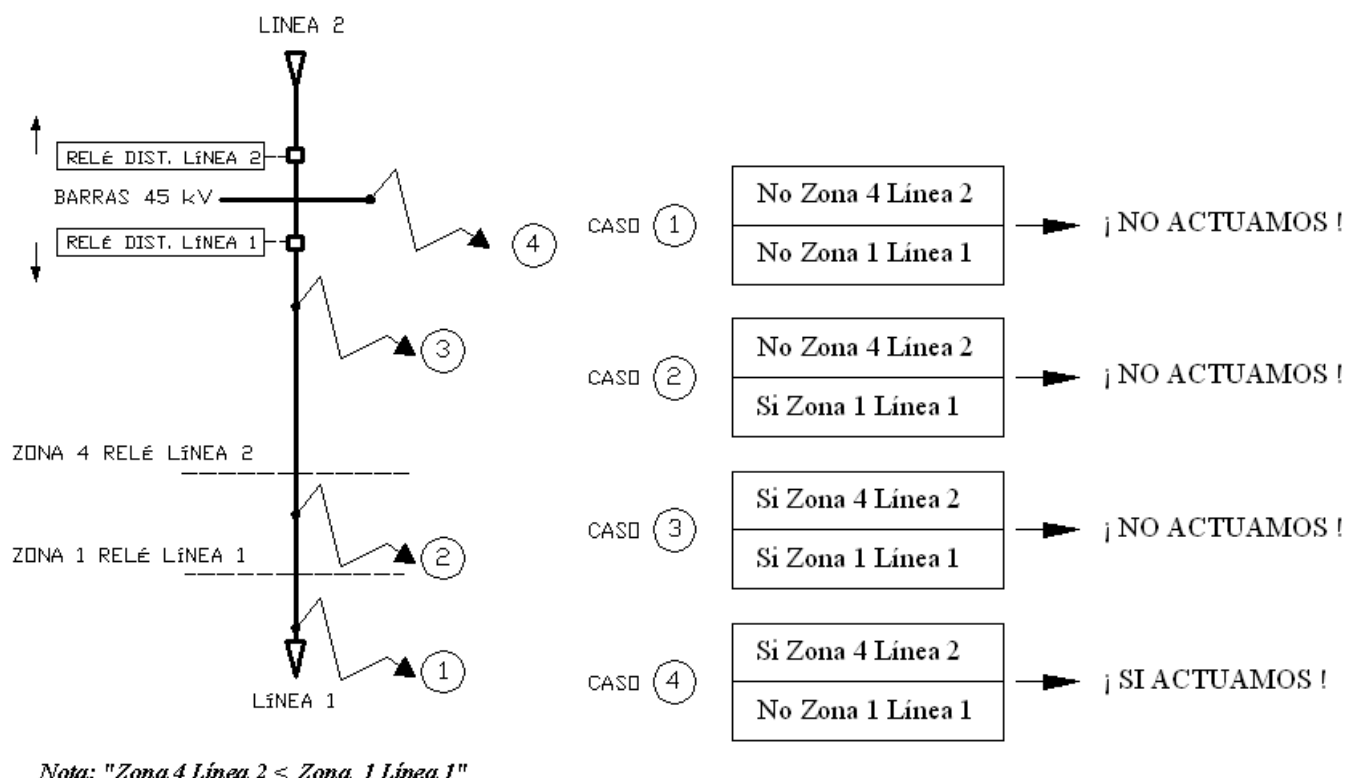


Figura 43. Alimentación de barras a través de línea auxiliar .

En este modo de explotación, como hemos comentado, el suministro de potencia a las barras no se hace a través de un transformador, sino desde una línea de alimentación que suministra energía desde una subestación remota. Por lo tanto, no podemos contar con los relés de los trafos, y debemos utilizar una forma alternativa de conseguirlo.

A la vista de la figura, observamos que nuestro sistema de protección actúa en el *Caso 4*, y que se deben dar dos condiciones:

- **Zona 4** relé de línea 2
- **NO Zona 1** relé línea 1

Recordemos que la *Zona 4* de los relés de distancia de línea podían sufrir un bloqueo y no señalizarse correctamente en el caso de apertura de alguno de los interruptores de extremo de línea, razón por la que se desestimo el diseño anterior. Por consiguiente, la decisión que se tomó para evitarlo fue que al menos un relé de distancia de una posición de línea debe señalizar la falta en *Zona 4* (hacia atrás), y además, que todos los relés de distancia de las líneas que estén acopladas a la barra en falta deben señalar que no están viendo la falta en *Zona 1* (hacia adelante).

Al igual que en el caso anterior, la solución pasa por introducir un pequeño retardo en la operación del sistema para asegurar la condición “*NO Zona 1 relé línea*” y conseguir un comportamiento selectivo. Sin embargo, en este caso el retardo se implementa en la señalización de *Zona 4* de los relés de distancia de línea, al no trabajar con las señales provenientes de las posiciones de transformador.

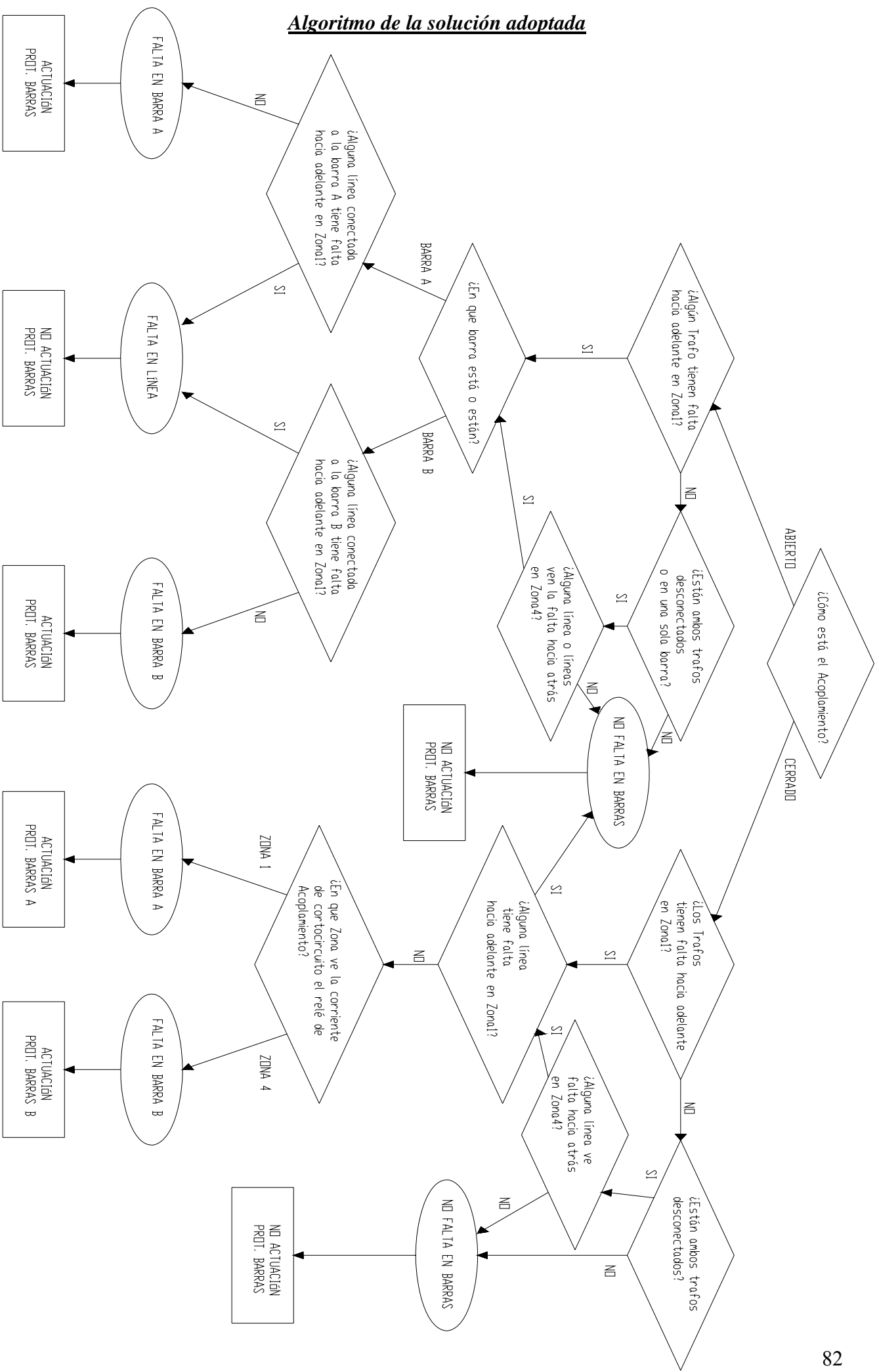
Como ya habíamos apuntado, la solución encontrada podía operar bajo todas las posibles topologías y modos de explotación de nuestra subestación sin embargo, sacrificaba la alta rapidez de operación que se conseguía en los otros diseños, a favor de la selectividad, y fue por tanto, nuestra solución adoptada.

Como en los diseños previos, una vez estipuladas las condiciones lógicas y las señales necesarias para realizar nuestro diseño, ya podíamos comenzar a diseñar nuestra solución.

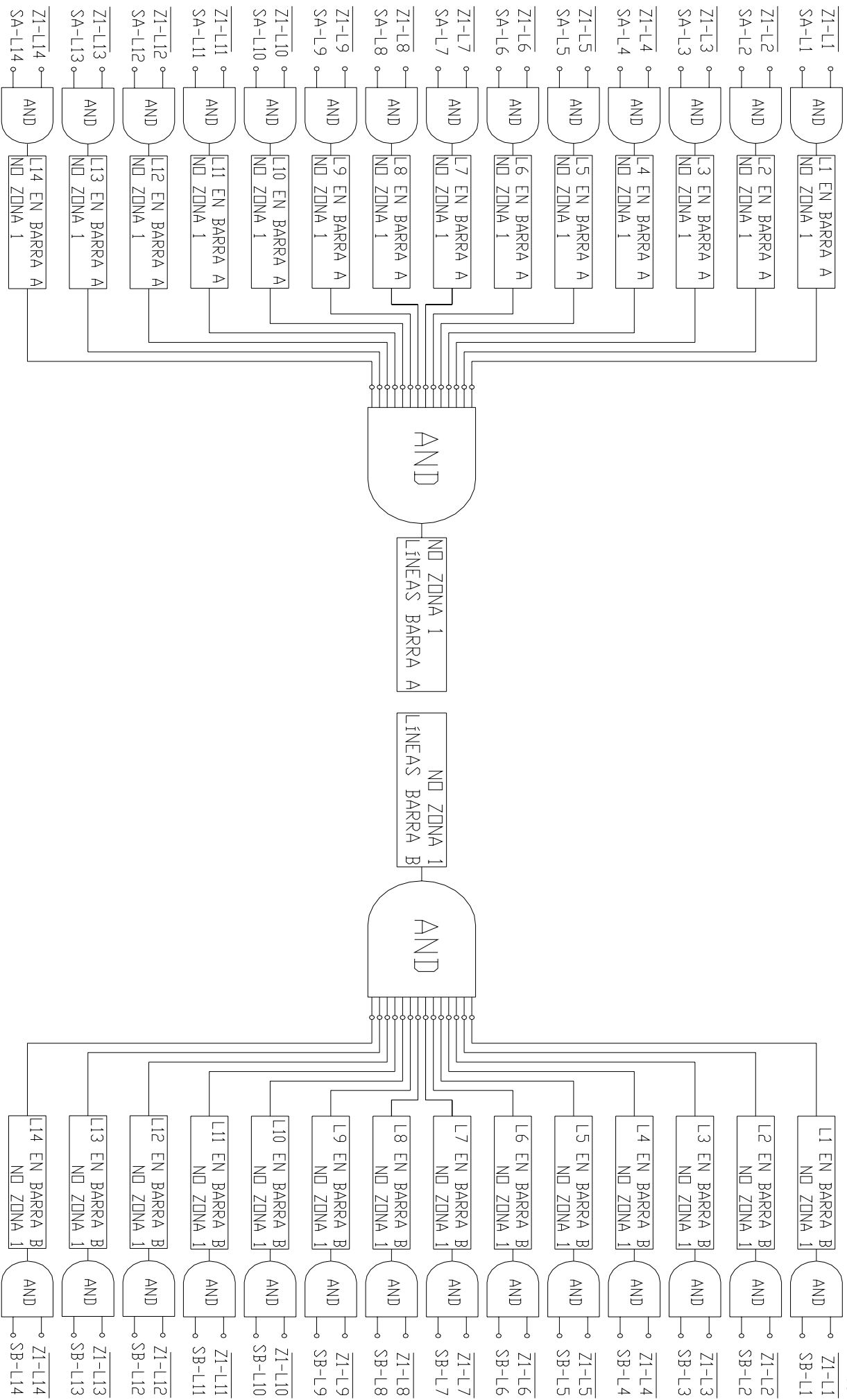
Los pasos acontecidos para el diseño final fueron los siguientes:

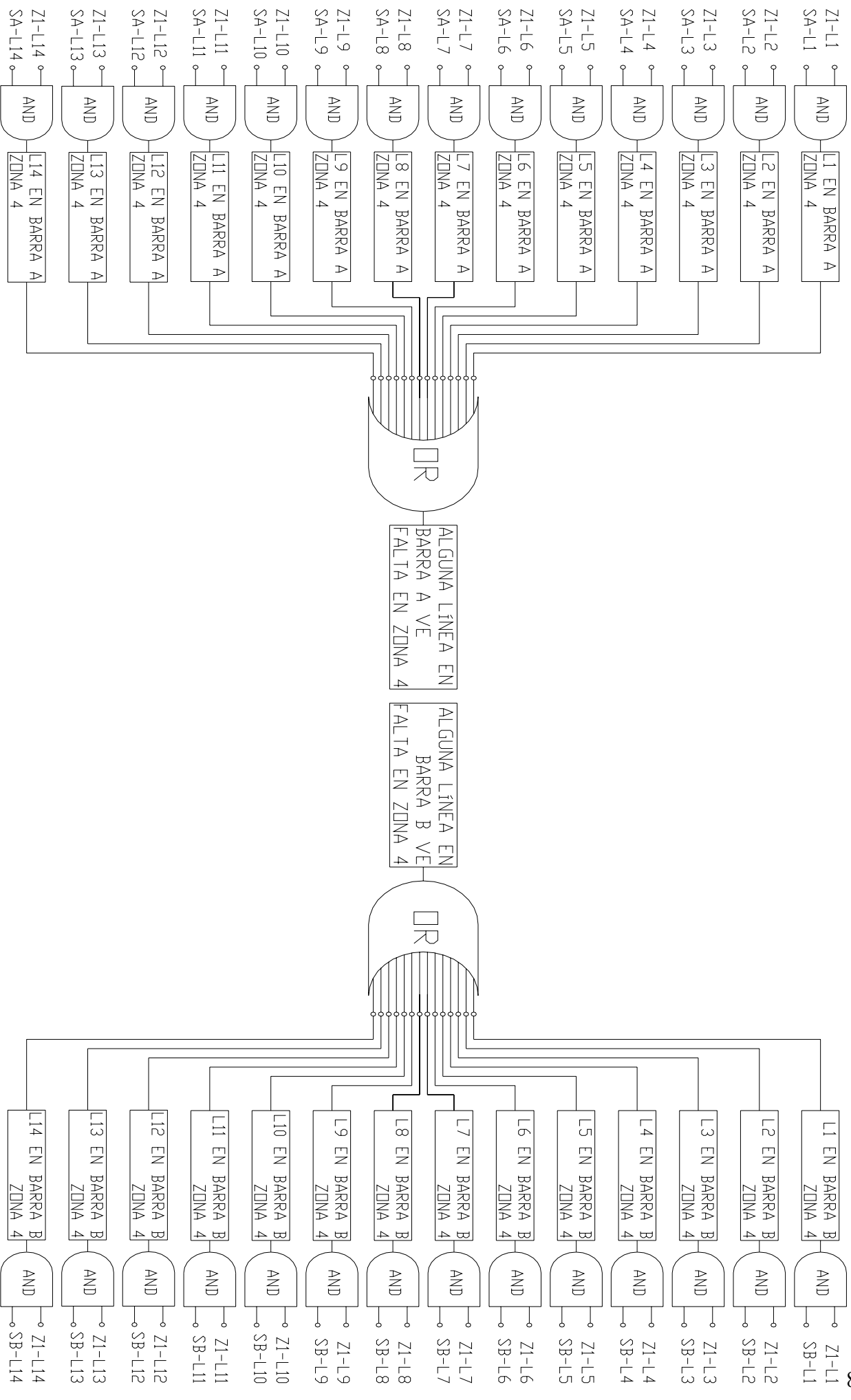
- *Establecimiento del Algoritmo Lógico de la solución.*
- *Diseño del Esquema Lógico de la solución.*
- *Desarrollo de los esquemas eléctricos y montaje de la solución.*

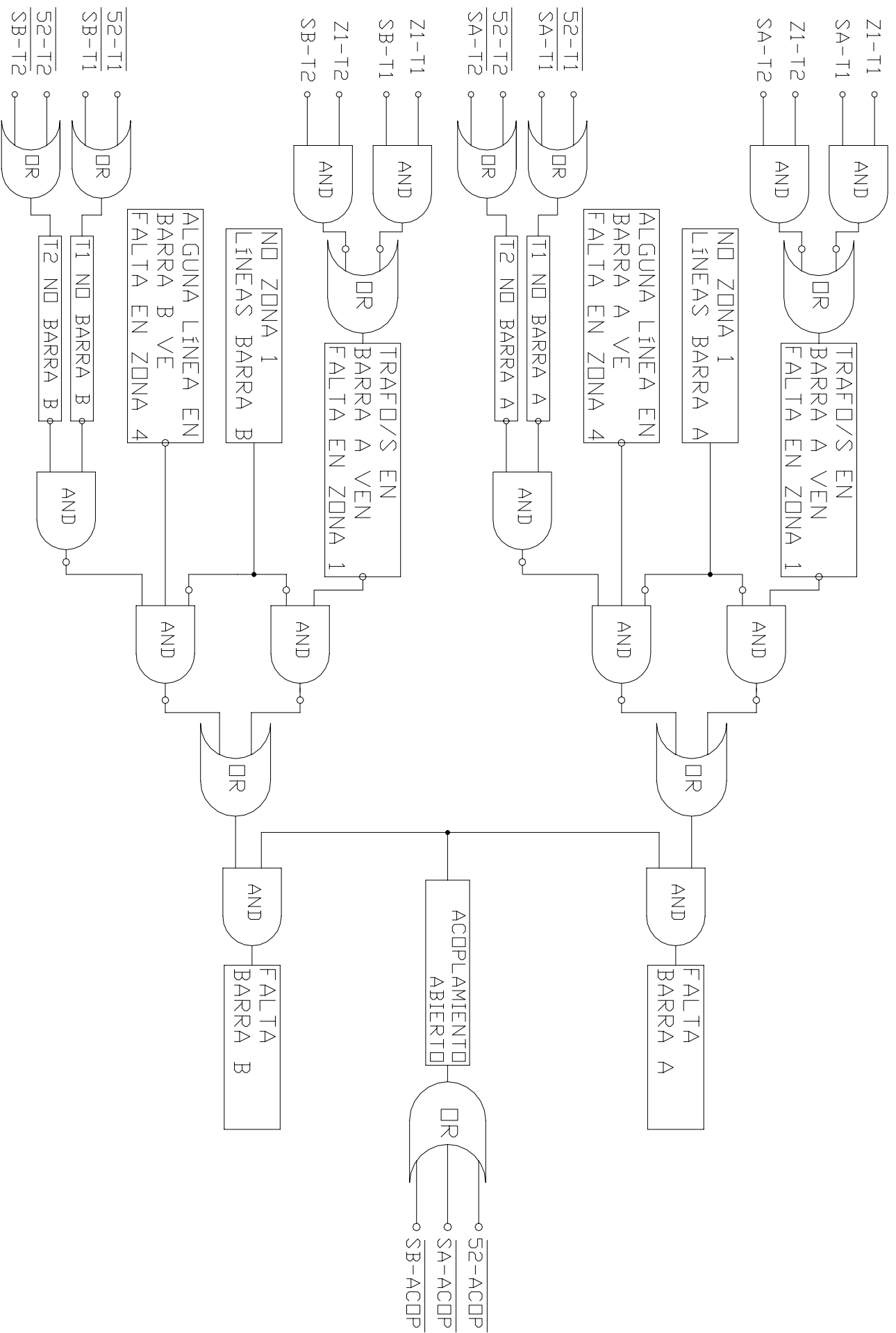
SISTEMA DE PROTECCIÓN DE BARRAS

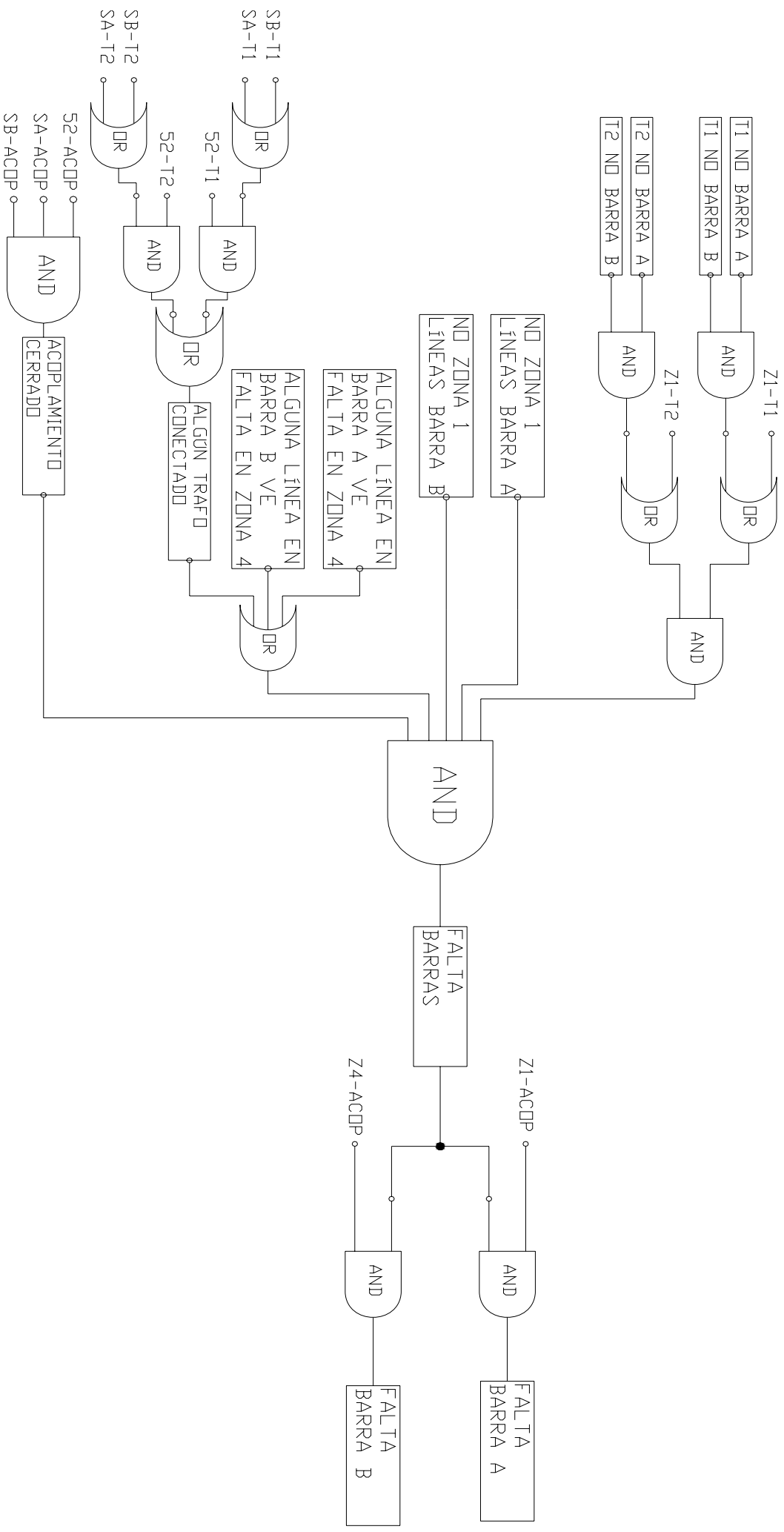


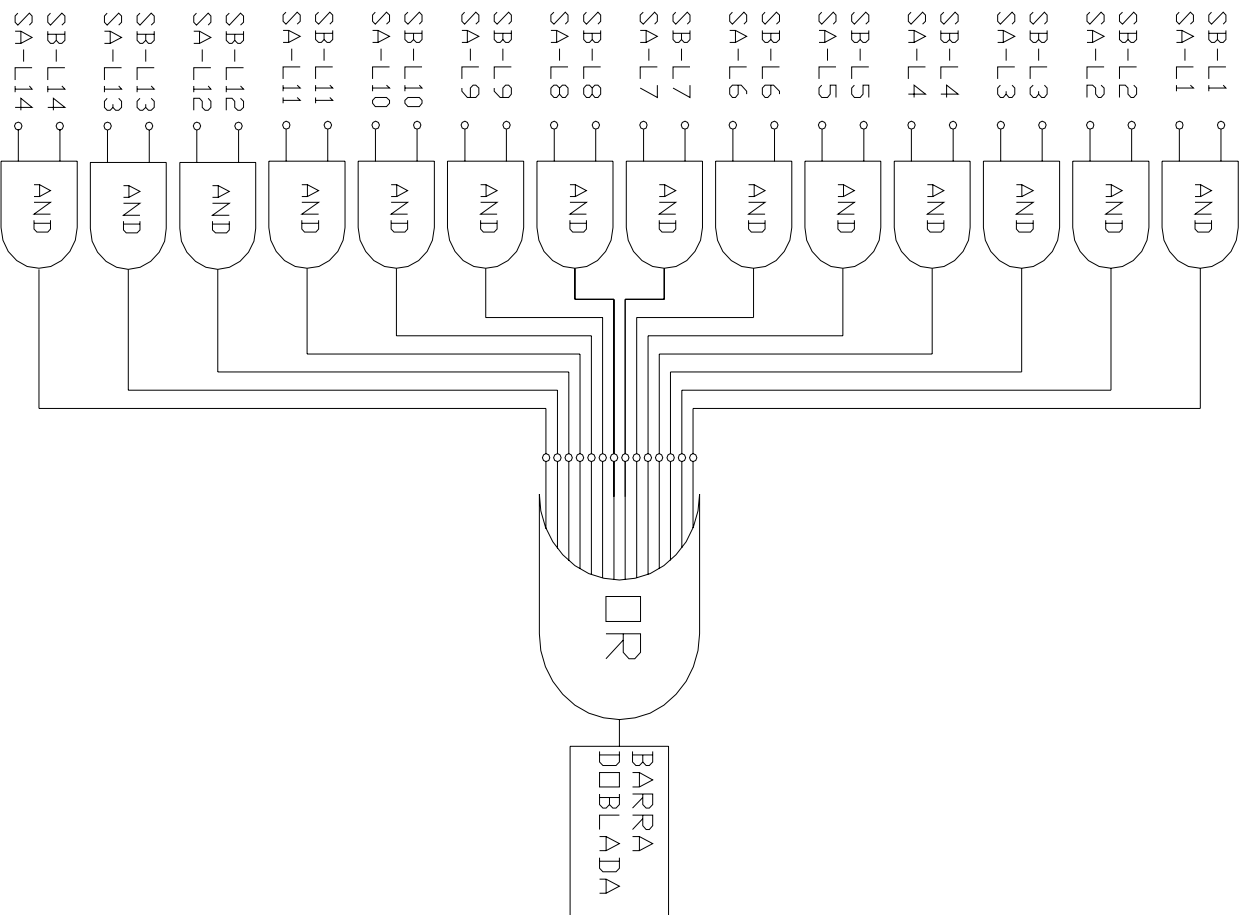
Esquema lógico solución adoptada

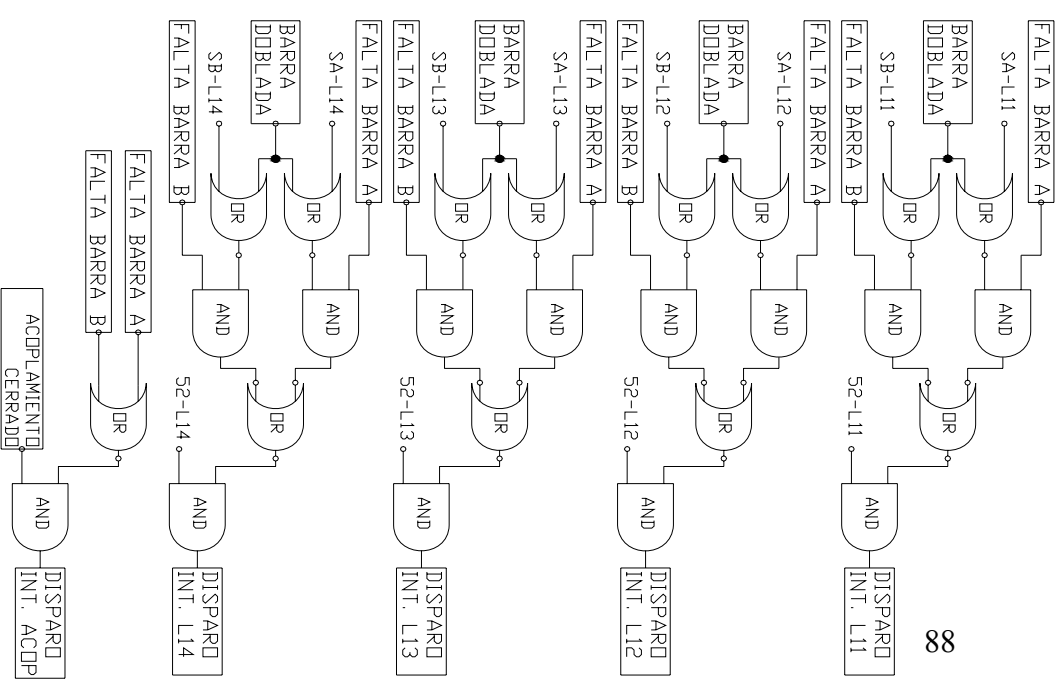
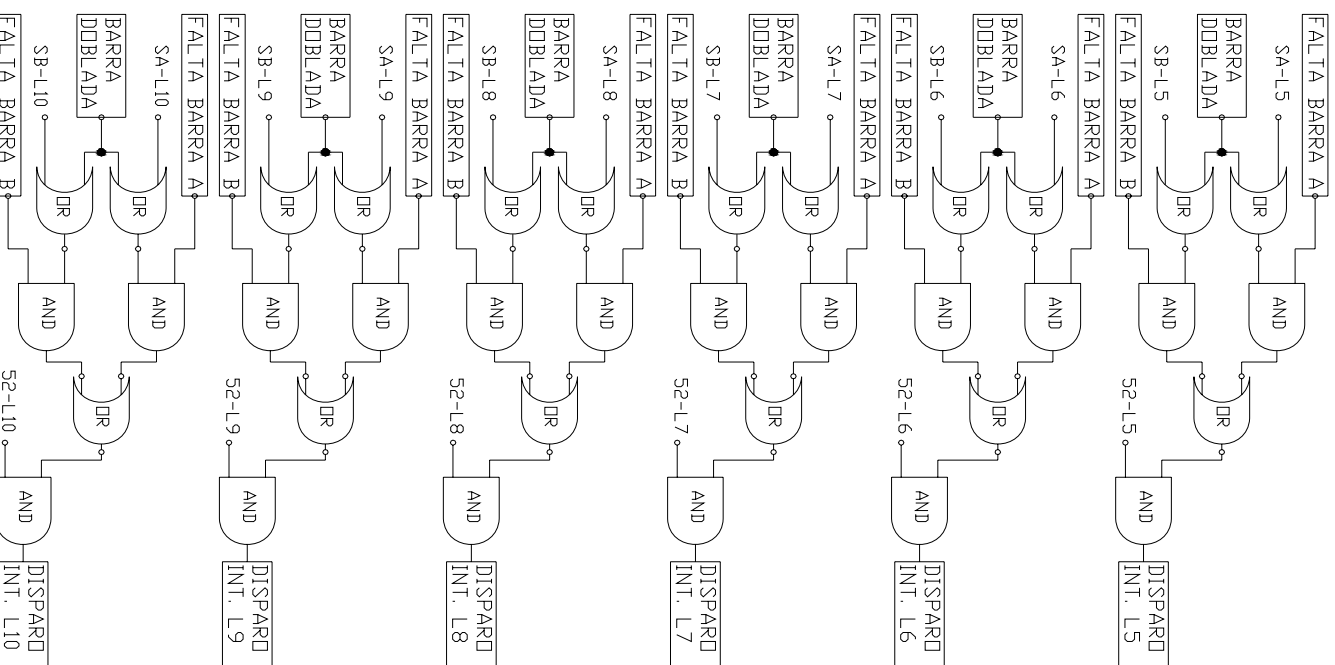
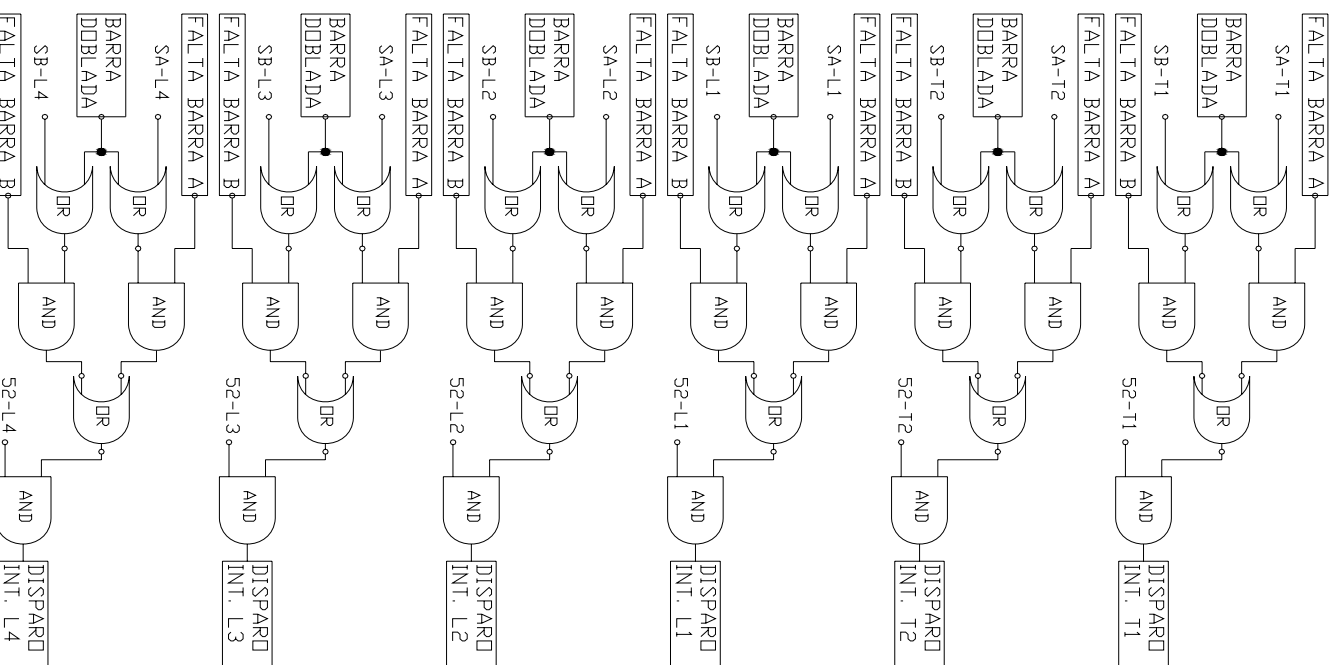












LISTA DE SEÑALES

SEÑAL	DESCRIPCIÓN
SA-L"X"	Estado del seccionador de barras A de la línea "X".
SA-T"X"	Estado del seccionador de barras A del transformador "X".
SA-ACOP	Estado del seccionador de barras A del acoplamiento.
SB-L"X"	Estado del seccionador de barras B de la línea "X".
SB-T"X"	Estado del seccionador de barras B del transformador "X".
SB-ACOP	Estado del seccionador de barras B del acoplamiento.
52-L"X"	Estado del interruptor de la línea "X".
52-T"X"	Estado del interruptor del transformador "X".
52-ACOP	Estado del interruptor del acoplamiento.
Z1-L"X"	Estado de la Zona 1 relé distancia línea "X".
Z1-T"X"	Estado de la Zona 1 relé distancia transformador "X".
Z1-ACOP	Estado de la Zona 1 relé distancia acoplamiento.
Z4-L"X"	Estado de la Zona 4 relé distancia línea "X".
Z4-ACOP	Estado de la Zona 4 relé distancia acoplamiento.
L"X" EN BARRA A NO ZONA 1	Línea "X" conectada a barras A no ve falta en Zona 1.
L"X" EN BARRA B NO ZONA 1	Línea "X" conectada a barras B no ve falta en Zona 1.
NO ZONA 1 LÍNEAS BARRAS A	Ninguna línea conectada a barras A ve falta en Zona 1.
NO ZONA 1 LÍNEAS BARRAS B	Ninguna línea conectada a barras B ve falta en Zona 1.
L"X" EN BARRA A ZONA 4	Línea "X" conectada a barras A ve falta en Zona 4.
L"X" EN BARRA B ZONA 4	Línea "X" conectada a barras B ve falta en Zona 4.
ALGUNA LÍNEA EN BARRA A VE FALTA EN ZONA 4	Alguna línea conectada a barras A ve falta en Zona 4.
ALGUNA LÍNEA EN BARRA B VE FALTA EN ZONA 4	Alguna línea conectada a barras A ve falta en Zona 4.
T"X" NO BARRA A	Transformador "X" no conectado a barras A.
T"X" NO BARRA B	Transformador "X" no conectado a barras B.
TRAFO/S EN BARRA A VEN FALTA EN ZONA 1	Transformadores conectados a barras A ven falta en Zona 1.
TRAFO/S EN BARRA B VEN FALTA EN ZONA 1	Transformadores conectados a barras B ven falta en Zona 2.
ALGÚN TRAFO CONECTADO	Al menos un transformador conectado a una barra.
BARRA DOBLADA	Alguna posición está conectada a barras A y B a la vez.
ACOPLAMIENTO ABIERTO	Acoplamiento abierto.
ACOPLAMIENTO CERRADO	Acoplamiento cerrado.
FALTA BARRA A	Existe falta en barras A.
FALTA BARRA B	Existe falta en barras B.
FALTA BARRAS	Existe falta en alguna barra.
DISPARO INT.L"X"	Orden de disparo del interruptor de línea "X".
DISPARO INT.T"X"	Orden de disparo del interruptor de transformador "X".
DISPARO INT.ACOP	Orden de disparo del interruptor acoplamiento.

Tabla 6. Lista de señales de la solución adoptada.

Esquemas eléctricos desarrollados

Los esquemas eléctricos desarrollados de la solución adoptada se encuentran en el Anexo de este documento.

Los esquemas desarrollados, constituyen el rutado de conexión y montaje completo de todos los dispositivos necesarios para la implementación de nuestro sistema final, así como de su disposición física y de montaje en envoltorio metálico (armario) de dimensiones y características normalizadas para Unión Fenosa Distribución. Todos los elementos instalados y cableados (mando, señalización y actuadores) son los estandarizados por Unión Fenosa Distribución como en el caso de la envoltorio.

También se ha tenido en cuenta las modificaciones que han de realizarse en los armarios de protección de líneas, transformador y acoplamiento con motivo de la incorporación del armario de protección de barras al conjunto del nivel de tensión de 45kV. Estas modificaciones se han llevado a cabo siguiendo los esquemas desarrollados de los armarios de protección de línea, transformador y acoplamiento que se adjuntan en el CD, y suponiendo que el relé de acoplamiento ha sido sustituido por el relé de distancia MICOM P441 de Areva.

Las modificaciones realizadas han sido las siguientes:

- Cableado de contactos auxiliares de estado de seccionadores, interruptores y relés auxiliares de todas las posiciones.
- Cableado de una salida adicional de los relés de distancia de líneas para señalar falta en Zona 4, la cuál no estaba programada (Salida B17).
- Recableado de la salida “Actuación Prot. distancia”(Salida E14) a través de relé auxiliar para su reconfiguración.
- Cableado del Telecontrol (Señalización remota de alarmas de la protección de barras).
- Cableado de los contactos del relé de disparo de la protección de barras.
- Cableado de bornas de conexión para realizar las modificaciones anteriores y la interconexión con el armario de protección de barras.
- Cableado implicado en la sustitución del relé de acoplamiento.

Las modificaciones en cuanto a programación de los relés de distancia, que han de realizarse en los armarios de protección de línea, transformador y acoplamiento con el software MICOM S1 para adaptar nuestro sistema son las siguientes:

- Programación de una salida adicional en los relés de línea para señalar falta en Zona 4. (Salida B17).

- Reconfiguración de la salida “Actuación Prot. Distancia” (Salida E14) por “Actuación Prot, Distancia hacia adelante” de los relés de línea.
- Configuración de la *Zona 1* y *Zona 4* del relé de acoplamiento.
- Configuración de retardos en Zona 1 de transformador y Zona 4 de línea.

4. COMPARATIVA ECONÓMICA.

En este apartado vamos a concretar el coste de la oferta económica de nuestra solución adoptada comparándola con el coste de la solución tradicional con relé de protección diferencial de barras.

4.1 SOLUCIÓN TRADICIONAL (RELÉ DIFERENCIAL DE BARRAS 87B).

Para una subestación eléctrica de las características de “*Cerro de la Plata*” se trataría del modelo GE BUS 1000 de General Electric. Al ser un número tan elevado de posiciones, se montaría en dos armarios cuyos precios están incluidos en el del relé, con un tercero para instalar los transformadores auxiliares de intensidad del relé, que son tres por posición de línea y transformador (uno por cada fase), y seis para la posición de acoplamiento (uno por cada fase de cada barra), que no caben ni en la cabina de Media Tensión ni en el armario del relé diferencial.

CANTIDAD	CONCEPTO	PRECIO UNIT. €	TOTAL €
1	Relé Diferencial de barras 87B + Fallo Interruptor BUS 1000 16 posiciones y Acoplamiento GENERAL ELECTRIC.	48.000,00	48.000,00
54	Transformador Aux. Intensidad 5/1 5P20 5 VA.	205,00	11.070,00
1	Envoltorio metálica de puerta transparente dim. 2000 x 800 x 700 mm con bastidor pivotante para TT's auxiliares.	1.100,00	1.100,00
	Material auxiliar.		175,00
	Cableado.		364,00
	Montaje y Pruebas eléctricas.		223,00
	SUMA NETO		60.932,00 €
	IVA 16 %		9.749,12 €
	TOTAL €		70.681,12 €

4.2 SOLUCIÓN ADOPTADA.

A continuación se presenta la oferta económica de nuestra solución proporcionada por la empresa de montajes eléctricos y cableados *PROYMECA S.L* proveedor de armarios eléctricos de control y protección para Unión Fenosa Distribución:

CANTIDAD	CONCEPTO	PRECIO UNIT. €	TOTAL €
1	Relé Vigilancia de tensión UJ2 125 Vcc + BASE JN-DE ARTECHE.	208,61	208,61
53	Relé Auxiliar Monoestable RD2 125Vcc + BASE DN-DE ARTECHE.	25,98	1.376,94
4	Relé Auxiliar Monoestable RF4 125Vcc + BASE DN-DE ARTECHE.	35,48	141,92
3	Relé Auxiliar Monoestable RI16 125Vcc + BASE I-DE ARTECHE.	338,63	1.015,89
31	Relé Auxiliar Biestable BF4 125Vcc + BASE FN-DE ARTECHE.	107,58	3.334,98
6	Relé Auxiliar Biestable BJ8 125Vcc + BASE JN-DE ARTECHE.	98,26	589,56
2	Pulsador C16BE 2NA ENTRELEC.	76,41	152,82
1	Selector CFA (En Servicio/Bloqueo) 2 contactos ENTRELEC.	63,33	63,33
4	Piloto luminoso XB4-BV65 T.E.E	4,95	19,80
3	Interruptor automático S282UCK6 + S2-H02 ABB.	56,24	168,72
1	Rótulo 200 x 45.	0,75	0,75
6	Rótulo 60x 20.	0,75	4,50
1	Equipo Alumbrado Armario.	45,00	45,00
242	Bornas de conexión UK5N PHOENIX CONTACT.	0,58	140,36
1	Envolverte metálica de puerta transparente dim. 2000 x 800 x 700 mm con bastidor pivotante.	1.100,00	1.100,00
	Material auxiliar.		687,00
	Cableado.		1.911,00
	Montaje y Pruebas eléctricas.		327,60
	SUMA NETO		11.288,78 €
	IVA 16 %		1.806,20 €
	TOTAL €		13.094,98 €

A este importe hay que incorporarle el coste perteneciente a la sustitución del relé de protección de Acoplamiento. Recordemos que el existente es un relé de sobreintensidad 8IRD-M1N ZIV, y el nuevo a instalar es un relé de protección de distancia MICOM P441 AREVA. Para facilitar el estudio del coste de esta modificación consideraremos que el valor residual del relé de sobreintensidad es de un 100%, por lo que el coste que conlleva la sustitución es simplemente la diferencia de precios proporcionada por ambos fabricantes.

CANTIDAD	CONCEPTO	PRECIO UNIT. €	TOTAL €
1	Armario de Protección Barras 45kV.	11.288,78	11.288,78
1	Relé de Prot. Distancia MICOM P441 AREVA	4.655,00	4.655,00
1	Relé de Prot. Sobreintensidad 8IRD-M1N AREVA	-1.452,83	-1.452,83
	SUMA NETO		14.490,95 €
	IVA 16 %		2.318,55 €
	TOTAL €		16.809,50 €

Nota: “No se han tenido en cuenta tanto en la solución tradicional como en la adoptada los costes de las mangueras de interconexión, instalación y puesta en marcha.”

“A la vista de los resultados podemos observar la ventaja económica obtenida con nuestro sistema de protección, que supone un ahorro mayor del 75% frente al coste de la protección de barras tradicional.”

5. CONCLUSIONES.

Una vez realizado el estudio completo, tanto técnico como económico, podemos llegar a la conclusión que de que este sistema a priori puede ser muy atractivo para su instalación y utilización como protección de barras en subestaciones eléctricas. Aun siendo un sistema que no goza de las “altas prestaciones” en cuanto a configuración, operación y tiempo de respuesta de los modernos relés digitales de protección, su bajo coste, hacen de él una buena herramienta como protección principal o de apoyo.

Otra de las ventajas que goza este sistema es su menor ocupación de espacio en comparación con el sistema tradicional, ya que mientras nuestra solución va montada en

un único armario, el sistema tradicional necesita tres, espacio que en subestaciones basadas en tecnología GIS blindada, generalmente está bastante ajustado.

Como colofón, me gustaría señalar que este proyecto me ha servido en gran manera en cuanto a mi aprendizaje en el mundo de las “protecciones eléctricas” y de la ingeniería eléctrica en general, y aunque ha habido momentos duros durante el mismo, ha sido un placer realizarlo y tomarlo como un preámbulo de lo que nos deparará nuestro futuro profesional.

No me gustaría terminar este documento sin agradecer a PROYMECA S.L. el soporte técnico tan profesional y desinteresado que me han ofrecido.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Paulino Montané, “Protecciones en las instalaciones eléctricas. Evolución y perspectivas”, 2ª edición, Marcombo Boixareu editores, 1993.
- [2] Andoni Iriondo Barrenetxea, “Protecciones de Sistemas de Potencia”, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- [3] José Ramírez Vazquez, “Estaciones de transformación y distribución. Protección de sistemas eléctricos.”, Ediciones Ceac, 1998.
- [4] Mª Ángeles Moreno, Juan Carlos Burgos, “Apuntes de la asignatura Instalaciones eléctricas I, Ingeniería tec. Industrial: electricidad”, 2007.
- [5] Catálogo técnico relés auxiliares ARTECHE.
[http://www.artech.com/artech/html/pdfs/57/31_RELES%20\(ES-EN\).pdf](http://www.artech.com/artech/html/pdfs/57/31_RELES%20(ES-EN).pdf)
- [6] Catálogo técnico bornas de conexión PHOENIX CONTACT.
<http://www.eshop.phoenixcontact.com/phoenix/>
- [7] Catálogo técnico int. Automáticos modulares ABB. “Catálogo Técnico System Pro M COMPAC”.
- [8] Catálogo técnico mando y señalización Telemecanique. “Catálogo 2007 de Mando y Señalización Harmony”.

7. ANEXO

7.1 ESQUEMAS ELÉCTRICOS DESARROLLADOS.

7.2 DOCUMENTACIÓN TÉCNICA.